



**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

---

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

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 334, № 3, 2023

Издательство  
Томского политехнического университета  
2023

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленекс 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)  
Чогегуров 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)  
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)  
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. 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, 2023

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – 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 георесурсов.

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

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

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

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](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://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 334, № 3, 2023

Tomsk Polytechnic University Publishing House  
2023

## 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)  
Belozеров 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)  
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)  
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

## AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

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.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Численный анализ влияния конфигурации системы воздухообмена на температурный режим локальных рабочих зон в помещении с газовым инфракрасным излучателем  
Борисов Б.В., Вяткин А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А. 7
- Intensification of oil inflow from carbonate reservoirs for the conditions of the Western Siberia fields  
Bychkov D.A., Zyatikov P.N. 17
- Металлоносные угли месторождения Шубарколь (Центральный Казахстан)  
Ибрагимова Д.А., Арбузов С.И., Портнов В.С. 26
- Metalliferous coals of Shubarkol deposit (Central Kazakhstan)  
Ibragimova D.A., Arbuzov S.I., Portnov V.S. 26
- Сравнительный анализ результатов стандартных и ускоренных полевых испытаний свайных фундаментов в многолетнемерзлых грунтах  
Николенко И.А., Кулешов А.П., Строкова Л.А. 40
- Comparative analysis of the results of standard and accelerated field tests of pile foundations in permafrost soils  
Nikolenko I.A., Kuleshov A.P., Strokova L.A. 40
- Эколого-геохимическое состояние подземных вод в районе грязевого вулкана в Сидоарджо (провинция Восточная Ява, Индонезия)  
Адиякса И.П., Савичев О.Г., Хвашчевская А.А. 51
- Ecological and geochemical condition of groundwater in the region of the mud volcano in Sidoarjo (East Java province, Indonesia)  
Adiyaksa I.P., Savichev O.G., Khvashchevskaya A.A. 51
- Минералогические особенности и способы переработки медных цинк-содержащих концентратов (Учалинский горно-богатительный комбинат)  
Васильева А.А., Бодуэн А.Я. 61
- Mineralogical features and processing of copper zinc-containing concentrates (Uchalinsky mining and processing plant)  
Vasileva A.A., Boduen A.Ya. 61
- Нестационарное моделирование пиролиза бензиновой фракции  
Бунаев А.А., Долганов И.М., Долганова И.О., Юрьев Е.М. 73
- Unsteady-state simulation of gasoline fraction pyrolysis  
Bunaev A.A., Dolganov I.M., Dolganova I.O., Yuriev E.M. 73
- Исследование пространственного распределения микроэлементов в почвах методом многомерного статистического анализа (на примере территории Далдынского кимберлитового поля, Северо-Западная Якутия)  
Гололобова А.Г. 89
- Investigation of the spatial distribution of microelements in soils by the method of multivariate statistical analysis (on the example of the territory of the Daldyn kiberlite field, northwestern Yakutia)  
Gololobova A.G. 89
- Термоминеральные воды Дагинского месторождения (остров Сахалин): физико-химические параметры и условия формирования  
Ершов В.В., Никитенко О.А., Жарков Р.В. 104
- Thermal mineral waters on the Daginsky field (Sakhalin Island): physical-chemical characteristics and formation conditions  
Ershov V.V., Nikitenko O.A., Zharkov R.V. 104
- Энергетическое применение картона в смеси с каменным углем  
Жуйков А.В., Фетисова О.Ю., Чичерин С.В., Кузнецов П.Н. 119
- Energy application of cardboard in mixture with coal  
Zhuykov A.V., Fetisova O.Yu., Chicherin S.V., Kuznetsov P.N. 119
- Математическое моделирование проникновения фильтра буровой промывочной жидкости в призабойную зону пласта с учетом вязкопластичных свойств нефти  
Никитин В.И. 130
- Mathematical modeling of drilling fluid filter penetration into the bottom-hole of formation taking into account oil viscoplastic properties  
Nikitin V.I. 130
- Оценка энергетической эффективности активных силовых фильтров для систем электроснабжения северных регионов  
Дыбко М.А. 138
- Estimation of energy efficiency of active power filters for power supply systems used in the northern areas  
Dybko M.A. 138
- Исследование теплового поля в скважине при заколонном движении жидкости в процессе индукционного воздействия  
Давлетшин Ф.Ф., Рамазанов А.Ш., Акчуринов Р.З., Шарафутдинов Р.Ф., Исламов Д.Ф. 153
- Investigation of thermal field in a well under fluid movement under induction impact  
Davletshin F.F., Ramazanov A.Sh., Akchurin R.Z., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. 153
- Прогнозное моделирование гидравлического разрыва пласта алюмосиликатными пропантантами, изготовленными на основе буровых шламов  
Третьяк А.А., Яценко Е.А., Доронин С.В., Борисов К.А., Кузнецова А.В. 165
- Predictive modeling of hydraulic fracturing by aluminosilicate proppants made based on drill cuttings  
Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Doronin S.V., Borisov K.A., Kuznetsova A.V. 165

- Особенности строения и условия формирования раннефаменинских рифогенных отложений южной части Денисовского прогиба Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции**  
Кривошеков С.Н., Боталов А.Н.
- 173 Structural features and formation conditions of early Famenian rifting sediments in the southern part of the Denisov depression of the Timan-Pechora oil and gas province**  
Krivoschekov S.N., Botalov A.N.
- Моделирование передачи акустической энергии через многослойную систему для изменения реологических свойств углеводородов**  
Азин А.В., Богданов Е.П., Рикконен С.В.
- 186 Simulation of acoustic energy transfer through a multilayer system for changing the rheological properties of hydrocarbons**  
Azin A.V., Bogdanov E.P., Rikkonen S.V.
- Separation of magnetic anomalies using fractal method in the Esfordi region for iron exploration, Central East Iran**  
Kalvarzi A.K., Shirazi A., Shirazy A., Pour A.B., Hezarkhani A., Nazerian H., Timkin T.V., Voroshilov V.G.
- 197 Разделение магнитных аномалий фрактальным методом для поиска железных руд, район Эсфорди, Центрально-Восточный Иран**  
Калварзи А.К., Ширази А., Ширази А., Пур А.Б., Хезархани А., Назерян Х., Тимкин Т.В., Ворошилов В.Г.
- Оценка соответствия результатов компьютерного моделирования притока жидкости к трещине гидроразрыва пласта реальным данным**  
Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У.
- 210 Assessment of compliance of the computer simulation results of liquid flow to fracture formation with real data**  
Yamkin M.A., Safiullina E.U.
- Математическая модель закачки вязкоупругих составов в продуктивный пласт**  
Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р.
- 218 Mathematical model for injecting viscoelastic compositions into the productive formation**  
Gasumov R.A., Gasumov E.R.
- Содержание токсичных элементов в уличной пыли и оценка риска для здоровья человека (Междуреченск, Южный Кузбасс)**  
Осипова Н.А., Осипов К.Ю., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимошенко Е.А., Новиков С.А.
- 229 Content of toxic elements in street dust and risk assessment for human health (Mezhdurechensk, Southern Kuzbass)**  
Osipova N.A., Osipov K.Yu., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Novikov S.A.

УДК 62-6

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ ВОЗДУХООБМЕНА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ЛОКАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ЗОН В ПОМЕЩЕНИИ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Борисов Борис Владимирович<sup>1</sup>,  
bvborisov@tpu.ru

Вяткин Александр Витальевич<sup>1</sup>,  
avv47@tpu.ru

Кузнецов Гений Владимирович<sup>1</sup>,  
kuznetsovgv@tpu.ru

Максимов Вячеслав Иванович<sup>1</sup>,  
elf@tpu.ru

Нагорнова Татьяна Александровна<sup>1</sup>,  
tania@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Наиболее перспективным вариантом энергоэффективной системы обеспечения регламентного теплового режима локальных рабочих мест, занимающих малую долю площадей больших по размерам цехов, являются системы так называемого «лучистого» отопления, основной частью которых являются газовые инфракрасные излучатели. Основную роль в формировании теплового режима локальной рабочей зоны играет процесс смешанной конвекции (движение воздуха вследствие его нагрева ограждающими конструкциями и потоками, которые формирует система воздухообмена). До настоящего времени анализ влияния месторасположения каналов системы воздухообмена на тепловой режим локальной рабочей зоны с использованием газового инфракрасного излучателя не выполнялся.

**Цель:** анализ по результатам математического моделирования с использованием модели влияния положения отверстий каналов системы воздухообмена на температурные поля локальных рабочих зон вблизи макета оборудования.

**Объект:** система отопления с использованием газового инфракрасного излучателя светлого типа и системы воздухообмена.

**Методы.** Математическое моделирование проведено в рамках двумерной модели сопряженного теплопереноса с применением метода конечных элементов. Для численного анализа процессов теплопереноса использовались модули «The Heat Transfer in Fluids Interface», «Surface-to-Surface Radiation» и «The Turbulent Flow, k-ε Interface» программной среды COMSOL Multiphysics.

**Результаты.** Приводятся результаты теоретических исследований, выполненных с целью определения влияния положения отверстий каналов системы воздухообмена на температурные поля и возможности управления процессом формирования регламентного теплового режима в локальных рабочих зонах при использовании газового инфракрасного излучателя. Представлены поля температур и скоростей, а также распределения температуры воздуха по высоте локальной рабочей зоны для различных вариантов расположения областей ввода и вывода системы воздухообмена. По результатам исследований выявлены основные закономерности процессов теплопереноса в рассматриваемых условиях, а также выявлена возможность управления процессами формирования теплового режима локальных рабочих зон, варьируя положения отверстий каналов системы воздухообмена, систем отопления на основе газового инфракрасного излучателя.

### Ключевые слова:

газовый инфракрасный излучатель, объект теплоснабжения,  
локальная рабочая зона, тепловые условия, конвективный теплообмен.

### Введение

Энерго- и ресурсосбережение становятся с каждым годом все более и более актуальными задачами [1, 2]. Энергосбережение актуально во всех отраслях промышленности и в социальной сфере [3, 4]. Наибольшие, скорее всего, резервы энергосбережения реальны в работе систем теплоснабжения промышленных предприятий в связи с тем, что площади и объёмы производственных помещений, занятые рабочими местами, как правило, много меньше (в десятки раз) общих площадей и объёмов цехов предприятий [5, 6]. По этим причинам многие производственные крупногабаритные помещения, построенные в прошлом, просто не используются.

В этой связи наиболее перспективным вариантом системы обеспечения регламентного теплового режима локальных рабочих мест, занимающих малую долю площадей больших по размерам цехов, являются системы так называемого «лучистого» отопления [7, 8], основной частью которых являются газовые инфракрасные излучатели (ГИИ) «тёмного» [9] или «светлого» [10] типа.

Но физические процессы, протекающие в локальной рабочей зоне при работе ГИИ, очень сложны [11, 12]. В связи с чем трудно, в отличие от традиционных систем «конвективного» отопления [13, 14], прогнозировать температурные поля локальных рабочих зон, в которых, как правило, находится не

только работающий человек, но и оборудование [15]. Кроме того, в подавляющем большинстве реальных производственных процессов необходим принудительный воздухообмен, влияние которого, как показал анализ [16], на температуру воздуха локальной рабочей зоны значительно.

Совокупность полученных ранее при проведении экспериментальных и теоретических исследований [15–18] результатов иллюстрирует не только самостоятельное влияние большой группы факторов (присутствие или отсутствие оборудования, работа системы воздухообмена, влияние ограждающих вертикальных и горизонтальных конструкций и др.). Результаты [15–18] дают основания для гипотезы о возможном совместном влиянии группы двух (или даже трёх) факторов на температуры воздуха в локальной рабочей зоне. Пока анализ такого совместного влияния нескольких факторов не выполнялся.

Проблема заключается в том, что в реальном варианте работы систем лучистого нагрева основную роль в формировании теплового режима локальной рабочей зоны играет процесс смешанной конвекции (движение воздуха вследствие его нагрева ограждающими конструкциями и потоками, которые формирует система воздухообмена). На движение же масс воздуха значимо влияют не только ограждающие конструкции, но также и сам ГИИ, оборудование и система воздухообмена.

Ранее установлено [15, 16], что при определённой схеме движения поступающего из системы воздухообмена воздуха последний увлекает за собой нагретый вблизи ГИИ воздух и переносит его в локальную рабочую зону. В результате температура в этой зоне снижается много меньше по сравнению с вариантом поступления только холодного воздуха из системы воздухообмена. Обоснованной в этой связи является гипотеза о том, что расположение входного и выходного отверстий каналов системы воздухообмена может заметно влиять на тепловой режим локальной рабочей зоны. Если такое влияние имеет место, то возможно управление процессом формирования регламентного теплового режима локальной рабочей зоны в результате выбора мест расположения входного и выходного отверстий каналов системы воздухообмена относительно ГИИ и оборудования.

Цель работы – анализ по результатам математического моделирования с использованием разработанной ранее [15, 16] модели влияния положения отверстий каналов системы воздухообмена на температурные поля локальных рабочих зон вблизи макета оборудования.

#### Численные исследования

Математическое моделирование проводилось в рамках двумерного приближения. Рассматривалась прямоугольная область размерами  $L_x=10 \times L_y=4,4$  м, ограниченная полом, стенами и потолком (ограждающие конструкции) с толщиной стен  $L_{wall}=0,1$  м и двумя горизонтальными конструктивными элементами (рис. 1), соответствующими ГИИ (размеры  $L_{x_{GIE}}=0,4$  м,  $L_{y_{GIE}}=0,05$  м) и панели (размеры  $L_{x_{tb}}=0,6$  м,  $L_{y_{tb}}=0,04$  м).

Панель располагалась на оси симметрии ГИИ на высоте 755 мм от пола ( $X_{tb}=6415$  мм,  $Y_{tb}=755$  мм). Координаты расположения источника лучистой энергии (ГИИ) и горизонтальной панели в области соответствовали наиболее типичному варианту их размещения в реальном производственном помещении, схема которого представлена на рис. 1. Воздух считался диатермичной средой, а все поверхности (стен, пола, потолка, ГИИ и оборудования) – непрозрачными серыми. Основные характеристики материалов элементов (объектов) конструкции приведены в табл. 1.

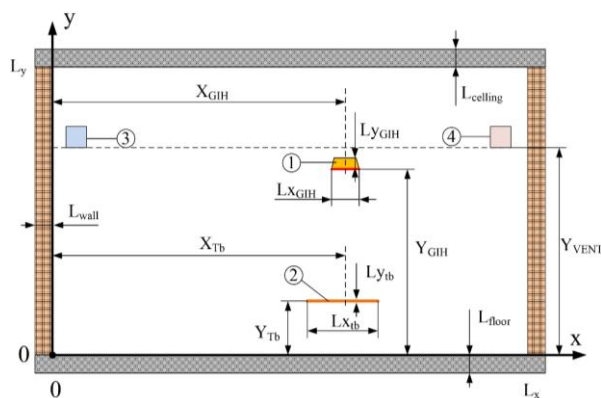


Рис. 1. Область решения задачи: 1 – ГИИ, 2 – панель, 3 – зона притока воздуха, 4 – зона оттока воздуха

Fig. 1. Problem solution area: 1 – gas infrared heater (GIH), 2 – panel, 3 – air inflow area, 4 – air outflow area

Математическое моделирование проведено в рамках модели теплопереноса [19, 20].

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов ограждающих конструкций и панели, использовавшихся в экспериментах [19]

Table 1. Thermophysical properties of building envelope materials and panels used in experiments [19]

Объект Object	Толщина $l$ , м Thickness, m	Материал Material	Плотность $\rho$ , кг м <sup>-3</sup> Density $\rho$ , kg m <sup>-3</sup>	Удельная теплоёмкость $c$ , Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup> Specific heat $c$ , J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт К <sup>-1</sup> м <sup>-1</sup> Thermal conductivity coefficient $\lambda$ , W K <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	Степень черноты $\epsilon$ Emissivity $\epsilon$
Пол, потолок и стены Floor, ceiling and walls	0,1	бетон concrete	2500	2400	1,55	0,95
Горизонтальная панель Horizontal panel	0,02	сосна pine	520	2300	0,15	0,4

Для численного анализа процессов теплопереноса использовались модули «The Heat Transfer in Fluids Interface» и «The Turbulent Flow, k- $\epsilon$  Interface» программной среды COMSOL Multiphysics. Моделирование проводилось в двухмерной постановке в области, схематично представленной на рис. 1. Для интегриро-



вания уравнений применялся метод конечных элементов. Параметры радиационного теплового потока рассчитывались с использованием модуля «Surface-to-Surface Radiation» для серых поверхностей с соответствующими степенями черноты в рамках зонной модели с учетом средних угловых коэффициентов.

На границах «воздух – ограждающие конструкции» для уравнений движения воздуха задавалось условие прилипания. На участке ввода воздуха задавались расход и температура, на выходе – постоянное давление, равное атмосферному. В качестве начальной температуры всех объектов расчета принималось значение 7 °С, считалось, что поступающий воздух приточной вентиляции обладает температурой 10 °С.

Перед проведением математического моделирования теплопереноса физическая адекватность постановки задачи расчета проверялась в процессе сравнительного анализа результатов численного моделирования с результатами проведенных экспериментальных исследований [15–17]. Удовлетворительное согласование результатов физического и математического моделирования позволило использовать выбранную математическую модель для оценки влияния воздухообмена на температуры в локальной рабочей зоне (области влияния ГИИ).

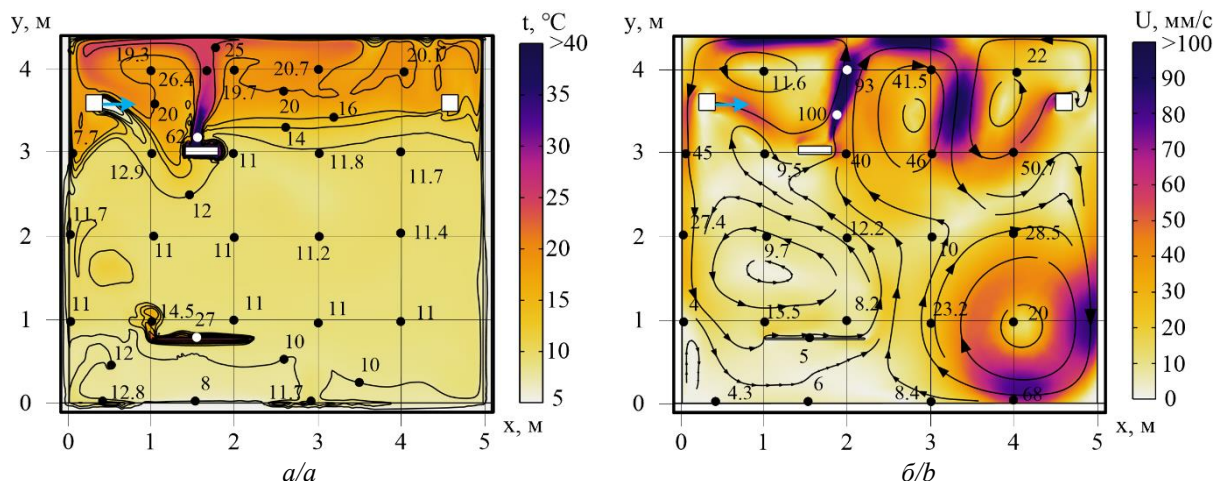
**Таблица 2.** Варианты расположения отверстий входного и выходного каналов системы воздухообмена и расходов воздуха

**Table 2.** Options for the location of the inlet and outlet channels openings of the air exchange system and air flow rates

Номер варианта Variant number	Расход воздуха, кг/(с·м <sup>3</sup> ) Air flow kg/(s·m <sup>3</sup> )	Координаты расположения отверстий входного и выходного каналов системы воздухообмена, мм Coordinates of the inlet and outlet channels openings of the air exchange system, mm		Номер рисунка Figure number
		Вход/Inlet	Выход/Outlet	
1	2·10 <sup>-4</sup>	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2950	2
2		X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2500	3
3		X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =500	4
4		X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	5
5		X=4500, Y <sub>VENT</sub> =4000	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	6
6		X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2500	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2950	7
7		X=4500, Y <sub>VENT</sub> =500	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	8
8		X=200, Y <sub>VENT</sub> =500	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	9
9	11·10 <sup>-4</sup>	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	10

При моделировании рассматривались типичные варианты расположения отверстий каналов системы воздухообмена (табл. 2).

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования для сочетания приведенных в таблице факторов, которое можно условно назвать базовым вариантом.



**Рис. 2.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область притока воздуха расположена слева на высоте 2950 мм, область оттока воздуха расположена справа на высоте 2950 мм

**Fig. 2.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the left at a height of 2950 mm, the air outflow area is located on the right at a height of 2950 mm

Линии тока (рис. 2, б) иллюстрируют образование в рассматриваемой области (достаточно реальный для практики вариант) нескольких циркуляционных течений, обусловленных влиянием потока воздуха, втекающего через систему воздухообмена. Этот рисунок также иллюстрирует влияние газового инфракрасного излучателя и макета оборудования на характер течения воздуха в такой сложной для анализа области. Можно сделать вывод, что для условий движения воздуха, соответствующих рис. 2, характерно снижение температуры в локальной рабочей зоне до значений, близких к температуре поступающего из системы «вентиляции» воздуха. При «высоком» (условно) положении выходного канала

этой системы (рис. 2) значительная часть воздуха, поступающего из внешней среды, не успевает перенести тепло из зоны вокруг ГИИ в локальную рабочую зону.

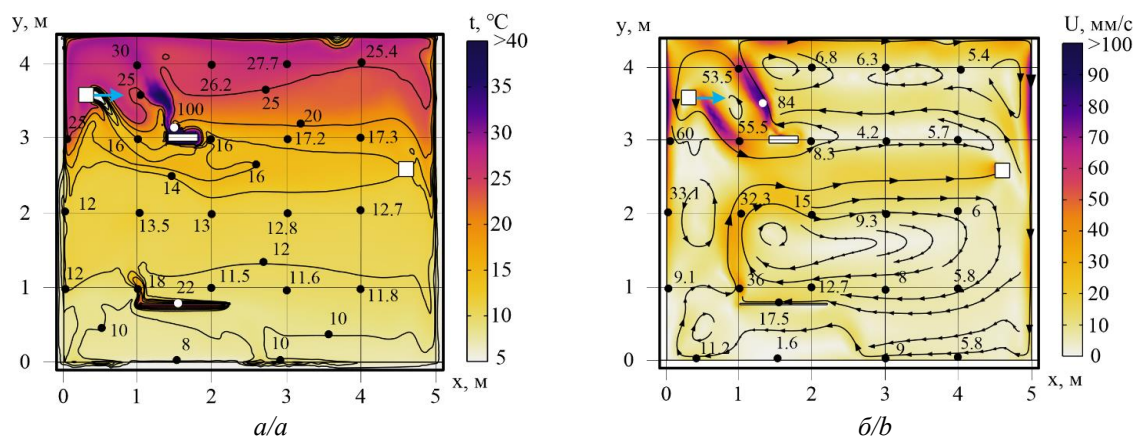
Смещение положения выходного канала вниз (рис. 3) на 0,5 м изменяет режим течения воздуха, но эти изменения практически не влияют на температуры локальных рабочих зон слева и справа от панели, имитирующей оборудование.

Дальнейшее смещение выходного канала системы воздухообмена (рис. 4) на 2 м вниз приводит к достаточно значимому (на 4–5 °С) изменению температур воздуха в локальных рабочих зонах. Такой результат обусловлен тем, что воздух из системы вентиляции в

большей степени увлекает «горячий» воздух, окружающий ГИИ.

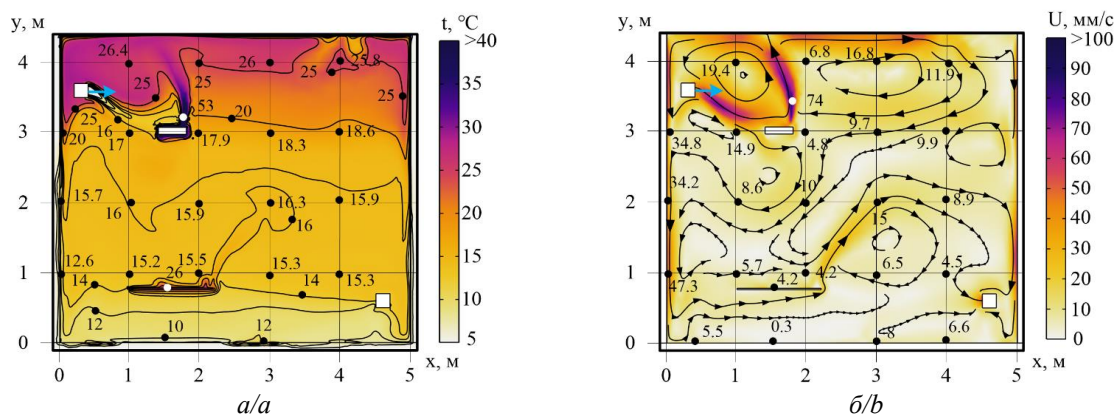
Следующая группа иллюстраций (рис. 5–8) показывает влияние теплоты, поступающей в систему от

нагретого корпуса ГИИ, на температуры воздуха в локальных рабочих зонах при изменении, по сравнению с базовым вариантом, положения входного и выходного каналов системы воздухообмена.



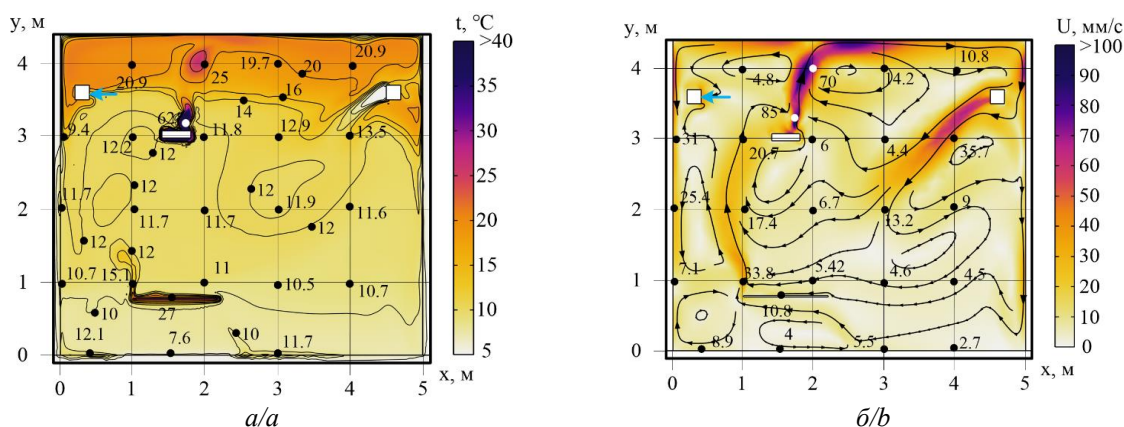
**Рис. 3.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ . Область притока воздуха расположена слева на высоте 2950 мм, область оттока воздуха расположена справа на высоте 2500 мм

**Fig. 3.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ . The air inflow area is located on the left at a height of 2950 mm, the air outflow area is located on the right at a height of 2500 mm



**Рис. 4.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ . Область притока воздуха расположена слева на высоте 2950 мм, область оттока воздуха расположена справа на высоте 500 мм

**Fig. 4.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ . The air inflow area is located on the left at a height of 2950 mm, the air outflow area is located on the right at a height of 500 mm

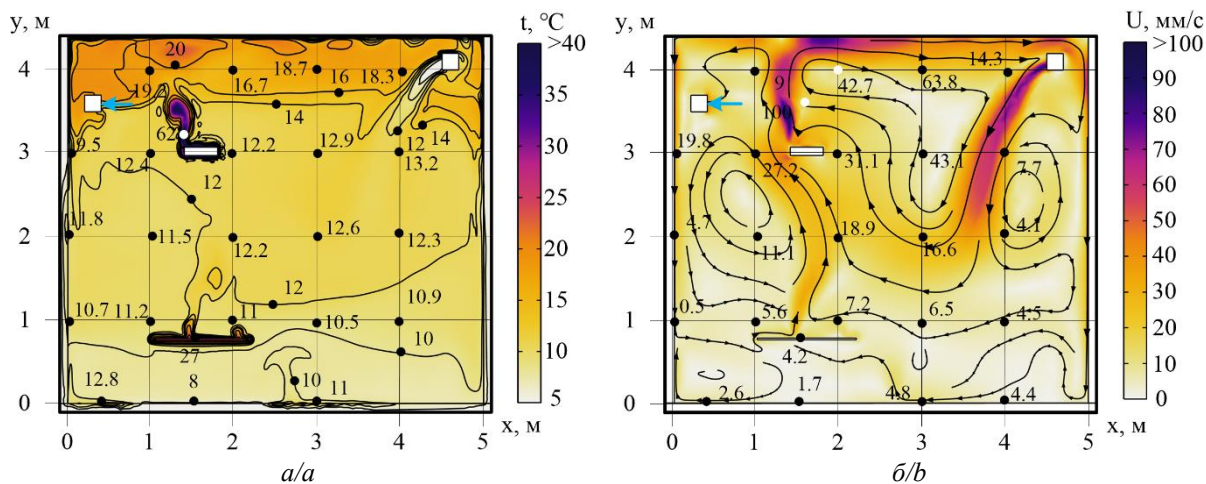


**Рис. 5.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ . Область ввода воздуха расположена справа на высоте 2950 мм

**Fig. 5.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ . The air inflow area is located on the right at a height of 2950 mm

Сравнение рис. 2, 3 и 5, 6 показывает, что изменения относительно локальной рабочей зоны положения входного и выходного отверстий каналов системы воз-

духообмена практически не влияют на температуры воздуха в локальных рабочих зонах при расположении на достаточно большой высоте этих отверстий.

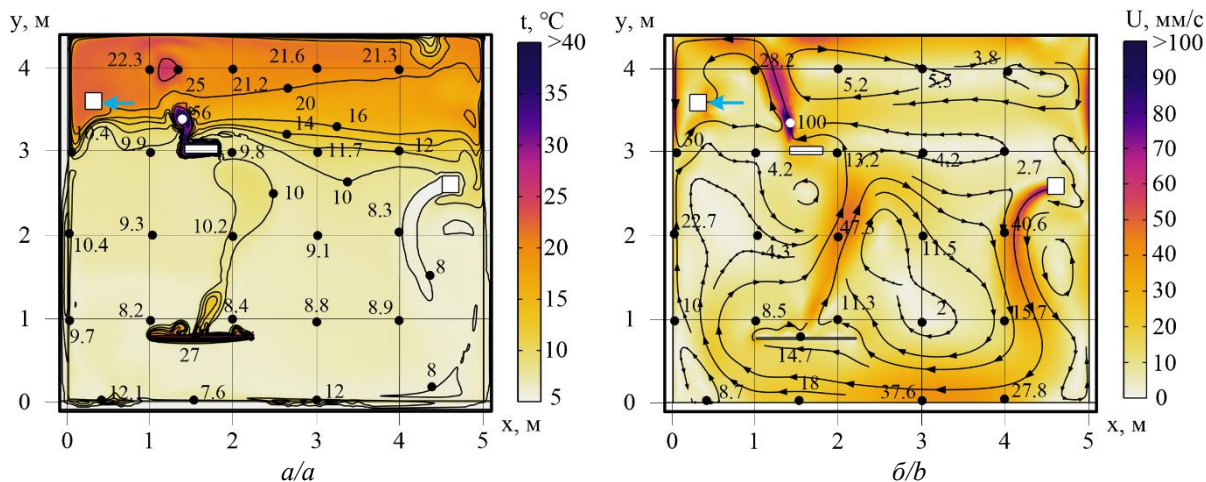


**Рис. 6.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена справа на высоте 4000 мм

**Fig. 6.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the right at a height of 4000 mm

Увеличение высоты положения выходного отверстия системы вентиляции при снижении высоты выходного отверстия приводит к достаточно значимому (рис. 7) снижению температур воздуха в локальных рабочих зонах. Последнее обусловлено тем, что поступающий в об-

ласть влияния ГИИ воздух из системы воздухообмена не может вызвать перемещение нагретого от корпуса ГИИ воздуха в рабочую зону. Соответственно, этот фактор не может оказать позитивного влияния на тепловой режим локальных рабочих зон (справа и слева от панели).



**Рис. 7.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена справа на высоте 2500 мм

**Fig. 7.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the right at a height of 2500 mm

Аналогичные результаты (рис. 8) получены и для условий притока относительно холодного воздуха из расположенного на высоте 0,5 м входного отверстия системы воздухообмена. И в этом случае геометрия течения такова, что воздух, нагретый корпусом ГИИ, не может попасть в локальные рабочие зоны.

Неблагоприятной для создания регламентного теплового режима локальной рабочей зоны является и схема расположения каналов приточно-вытяжной вентиляции, приведенная на рис. 9. Ввод «свежего» воздуха в нижней части помещения также не даёт возможности вовлечь в процесс формирования регламентного теплового режима локальной рабочей зоны теплоты, отводимой от корпуса газового инфракрасного излучателя.

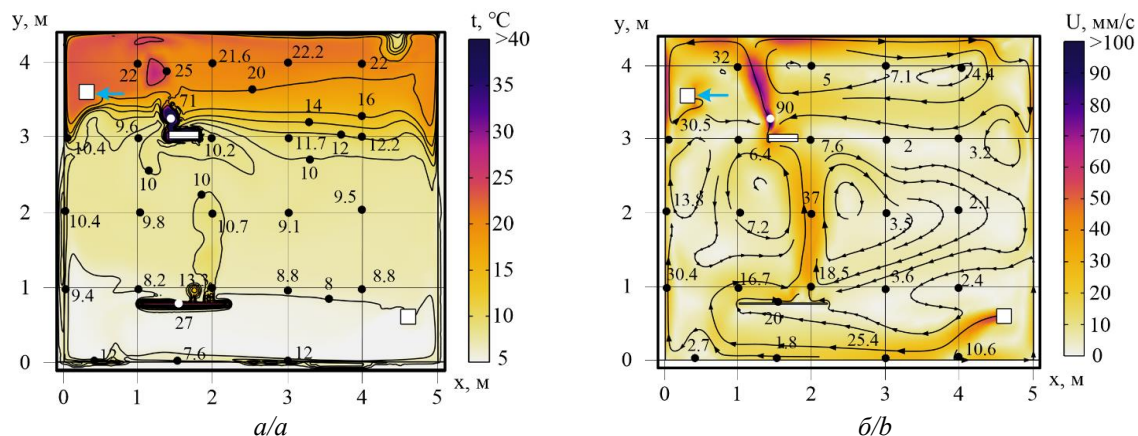
Неблагоприятной для создания регламентного теплового режима локальной рабочей зоны является и схема расположения каналов приточно-вытяжной

вентиляции, приведенная на рис. 9. Ввод «свежего» воздуха в нижней части помещения также не даёт возможности вовлечь в процесс формирования регламентного теплового режима локальной рабочей зоны теплоты, отводимой от корпуса газового инфракрасного излучателя.

В дополнение к проведённому анализу выполнена оценка влияния увеличения интенсивности притока воздуха на поле температур локальной рабочей зоны

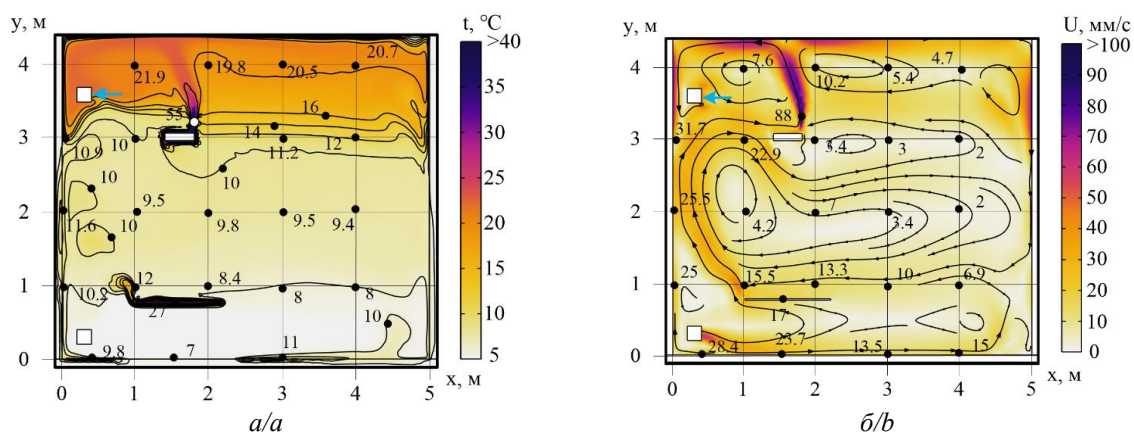
(рис. 10). Сравнение рис. 5 и 10 приводит к достаточно очевидному выводу: увеличение интенсивности притока относительно холодного воздуха при одинаковом

положении входного и выходного отверстий каналов системы воздухообмена приводит к небольшому, но снижению температур в локальной рабочей зоне.



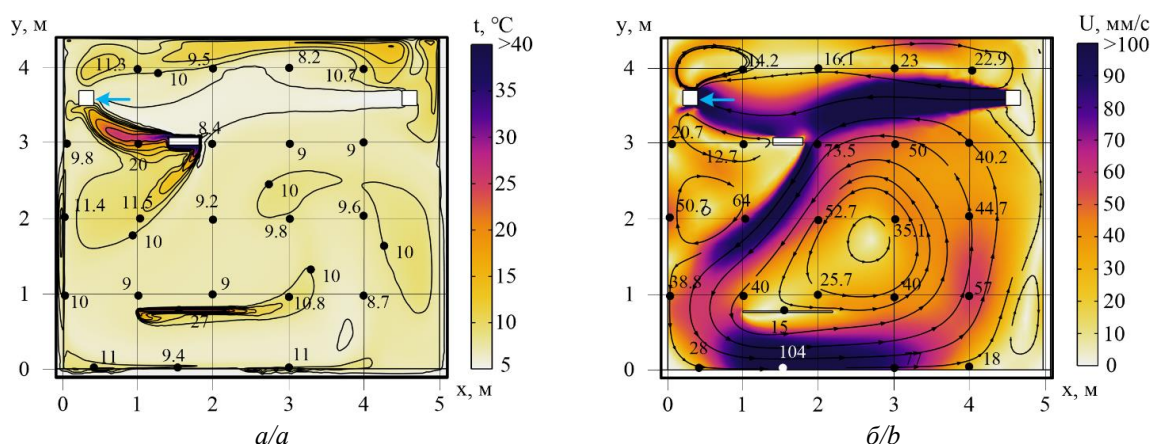
**Рис. 8.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена справа на высоте 500 мм

**Fig. 8.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIN operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the right at a height of 500 mm



**Рис. 9.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена слева на высоте 500 мм

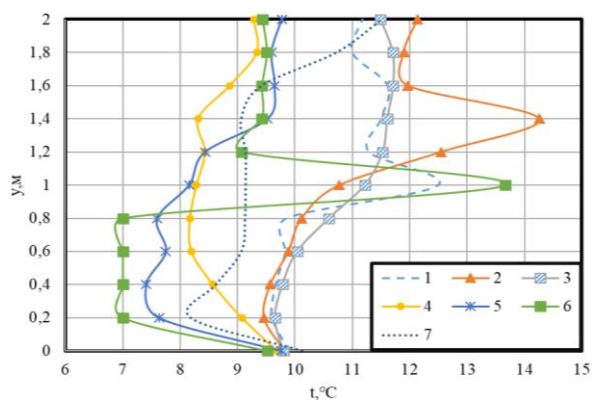
**Fig. 9.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIN operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the left at a height of 500 mm



**Рис. 10.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=11 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена справа на высоте 2950 мм

**Fig. 10.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIN operation.  $G=11 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the right at a height of 2950 mm

На рис. 11–13 приведены распределения температур в локальных рабочих зонах справа и слева от макета оборудования для нескольких вариантов расположения отверстий входного и выходного каналов системы воздухообмена.

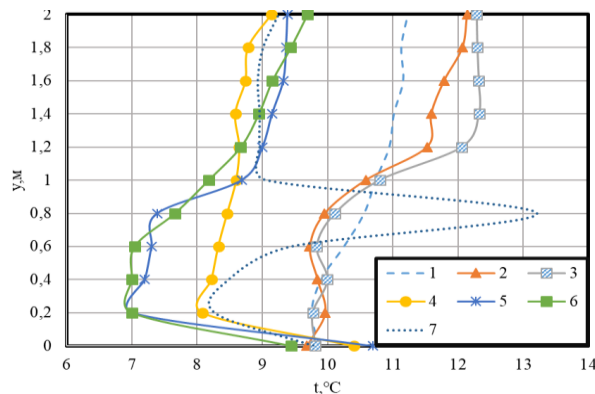


**Рис. 11.** Распределение температуры воздуха по сечению на расстоянии 20 см слева от панели через 1 час работы ГИИ для различных вариантов расположения отверстий системы воздухообмена: 1 – вариант 3; 2 – вариант 4; 3 – вариант 5; 4 – вариант 6; 5 – вариант 7; 6 – вариант 8; 7 – вариант 9

**Fig. 11.** Air temperature distribution over the section at a distance of 20 cm to the left of the panel after 1 hour of GIH operation for various options of the location of the air exchange system channels: 1 – variant 3; 2 – variant 4; 3 – variant 5; 4 – variant 6; 5 – variant 7; 6 – variant 8; 7 – variant 9

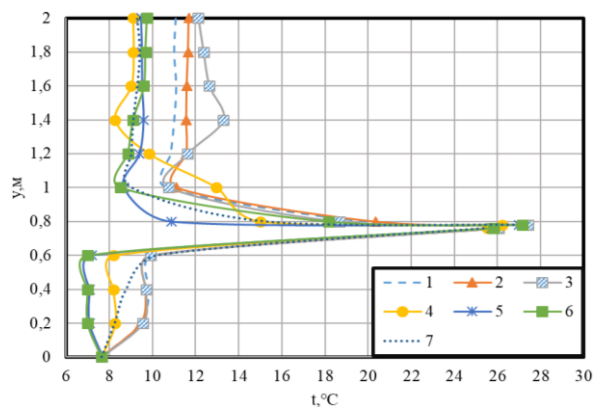
Хорошо видно (рис. 11), что, изменяя расположение отверстий каналов системы воздухообмена относительно локальной рабочей зоны, можно изменять температуру воздуха в зоне между оборудованием и левой вертикальной ограждающей конструкцией на 3–4 °С. Анализ результатов численного моделирования показывает, что положительный эффект (рост температуры) достигается вследствие использования теплоты газов, нагретых корпусом газового инфракрасного излучателя. Аналогичный вывод можно сделать и после анализа температур воздуха в локальной рабочей зоне справа от макета оборудования (рис. 12). Для всех вариантов расположения отверстий каналов системы воздухообмена температуры в характерных сечениях левой и правой рабочих зон различаются незначительно (не более 1 °С). Последнее иллюстрирует умеренное влияние левой вертикальной ограждающей конструкции (кирпичной стены) на температуры в прилегающей к этой конструкции локальной рабочей зоне.

Распределения  $t(y)$  в сечении, проходящем через ось симметрии зоны влияния ГИИ (над панелью), иллюстрируют возможность влияния оборудования на формирование теплового режима локальных рабочих зон. Панель, по существу, играет роль теплообменника, трансформирующего поступающую от ГИИ энергию в теплоту, аккумулируемую воздухом над панелью и затем передаваемую в локальные рабочие зоны слева и справа от панели.



**Рис. 12.** Распределение температуры воздуха на расстоянии 20 см справа от панели через 1 час работы ГИИ для различных вариантов расположения отверстий системы воздухообмена: 1 – вариант 3; 2 – вариант 4; 3 – вариант 5; 4 – вариант 6; 5 – вариант 7; 6 – вариант 8; 7 – вариант 9

**Fig. 12.** Air temperature distribution over the section at a distance of 20 cm to the right of the panel after 1 hour of GIH operation for various options of the location of the air exchange system channels: 1 – variant 3; 2 – variant 4; 3 – variant 5; 4 – variant 6; 5 – variant 7; 6 – variant 8; 7 – variant 9



**Рис. 13.** Распределение температуры воздуха на оси симметрии зоны влияния ГИИ ( $0 < Y < 2$  м) через 1 час работы ГИИ для различных вариантов расположения отверстий системы воздухообмена: 1 – вариант 3; 2 – вариант 4; 3 – вариант 5; 4 – вариант 6; 5 – вариант 7; 6 – вариант 8; 7 – вариант 9

**Fig. 13.** Air temperature distribution on the symmetry axis of the GIH influence zone ( $0 < Y < 2$  m) after 1 hour of GIH operation for various options of the location of the air exchange system channels: 1 – variant 3; 2 – variant 4; 3 – variant 5; 4 – variant 6; 5 – variant 7; 6 – variant 8; 7 – variant 9

### Заключение

Результаты выполненного численного моделирования процессов теплопереноса в условиях «лучистого» нагрева локальной рабочей зоны производственного помещения показали возможность управления процессами формирования теплового режима локальных рабочих зон, варьируя положения отверстий каналов системы воздухообмена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00226).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Energy-saving solution in the heating system of buildings / N. Kobleev, S. Emelyanov, V. Kretova, A. Morzhavin, V. Amelin, V. Kobleev // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 117. – P. 186–190.
2. Jezierski W., Sadowska B., Pawłowski K. Impact of changes in the required thermal insulation of building envelope on energy demand, heating costs, emissions, and temperature in buildings // *Energies*. – 2021. – V. 14. – Iss. 1. – Article number 14010056.
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. – V. 215. – P. B. – Article number 119175.
4. 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. – V. 66. – Article number 102659.
5. Gourlis G., Kovacic I. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – a case study // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 68. – Pt. 2. – P. 953–963.
6. A real industrial building: modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit / F. Ascione, N. Bianco, T. Iovane, G.M. Mauro, D.F. Napolitano, A. Ruggiano, L. Viscido // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – V. 29. – Iss. 1. – Article number 101186.
7. Редько А.Ф., Болотских Н.Н. Совершенствование систем отопления производственных помещений газовыми трубчатыми инфракрасными нагревателями // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2010. – Т. 74. – № 4. – С. 36–47.
8. Экспериментальное исследование системы отопления с инфракрасными излучателями / В.В. Бухмиров, Ю.С. Солнышкова, М.В. Пророкова, Н.Н. Болотских // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2011. – № 3. – С. 12–16.
9. Смыков А.А. Тепловой режим наружных ограждающих конструкций в зданиях с лучистыми системами отопления на базе инфракрасных излучателей // *Наука. Мысль: электронный периодический журнал*. – 2017. – № 5. – С. 5–8.
10. Повышение коэффициента полезного действия лучистой системы отопления с применением в качестве отопительных приборов «светлых» газовых инфракрасных излучателей / Н.И. Куриленко, М.Н. Чекардовский, Л.Ю. Михайлова, А.Н. Ермолаев // *Инженерный вестник Дона*. – 2015. – Т. 38. – № 4. – С. 73–82.
11. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Солнышкова Ю.С. Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2010. – № 4. – С. 1–3.
12. 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. – V. 110. – Article number 01033.
13. 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. – V. 23. – P. 291–300.
14. Ghasemi M., Toghraie D., Abdollahi A. An experimental study on airborne particles dispersion in a residential room heated by radiator and floor heating systems // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – V. 32. – Article number 101677.
15. Thermal conditions of the local working area heated by a gas infrared heater under the mixed convection state / B.V. Borisov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – V. 2211. – Article number 012022.
16. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system / B.V. Borisov, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – V. 2057. – Article number 012125.
17. 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.
18. 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. – V. 22. – Article number 100851.
19. DOE Fundamentals handbook – thermodynamics, heat transfer and fluid flow. – USA: US Department of Energy, 2016. – V. 2. – 80 p.
20. Hesaraki 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. – V. 49. – Article number 101661.

Поступила: 25.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 08.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Борисов Б.В.**, доктор физико-математических наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Вяткин А.В.**, аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кузнецов Г.В.**, доктор физико-математических наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Максимов В.И.**, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Нагорнова Т.А.**, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 62-6

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE AIR EXCHANGE SYSTEM CONFIGURATION ON THE TEMPERATURE REGIME OF LOCAL WORKING AREAS IN A ROOM WITH A GAS INFRARED HEATER

**Boris V. Borisov**<sup>1</sup>,  
bvborisov@tpu.ru

**Alexander V. Vyatkin**<sup>1</sup>,  
avv47@tpu.ru

**Geniy V. Kuznetsov**<sup>1</sup>,  
kuznetsovgv@tpu.ru

**Vyacheslav I. Maksimov**<sup>1</sup>,  
elf@tpu.ru

**Tatiana A. Nagornova**<sup>1</sup>,  
tania@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** The most promising option for an energy-efficient system for ensuring the scheduled thermal regime of local workplaces, which occupy a small area in large workshops, are the so-called «radiant» heating systems, the main part of which are gas infrared heaters. The main role in the formation of the thermal conditions of the local working area is played by the process of mixed convection (the air movement due to its heating by enclosing structures and flows that form the air exchange system). The analysis of the influence of the location of the air exchange system channels on the thermal regime of the local working area using a gas infrared emitter has not been performed so far.

**The main aim** of the research is to analyze the influence of the position of the air exchange system's openings channels on the temperature fields of local working areas near the equipment model based on the results of mathematical modeling.

**Objects:** heating system using high-intensity gas infrared heater and air exchange system.

**Methods.** Mathematical modeling was carried out within the framework of a two-dimensional model of conjugate heat transfer using the finite element method. The modules «The Heat Transfer in Fluids Interface», «Surface-to-Surface Radiation» and «The Turbulent Flow, k-ε Interface» of the COMSOL Multiphysics software environment were used for the numerical analysis of heat transfer processes.

**Results.** The paper introduces the results of mathematical modeling carried out to determine the influence of the position of the air exchange system's channels on the temperature fields and the possibility of controlling the process of a scheduled thermal regime formation in local working areas when using a gas infrared heater. The temperatures and velocities fields, as well as the air temperature distribution along the height of the local working area for various options of the air exchange system's inflow and outflow areas location are presented. Based on the results of the research, the main regularities of the processes of heat and mass transfer under the considered conditions were revealed. The possibility of controlling the processes of thermal regime formation of local working areas by varying the air exchange system channels position was also revealed.

### Key words:

gas infrared heater, heat supply object, local working area, thermal conditions, convective heat transfer.

*This work is supported by the Russian Science Foundation (grant no. 20-19-00226).*

### REFERENCES

1. 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.
2. Jezierski W., Sadowska B., Pawłowski K. Impact of changes in the required thermal insulation of building envelope on energy demand, heating costs, emissions, and temperature in buildings. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 1, Article number 14010056.
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, P. B, Article number 119175.
4. 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, Article number 102659.
5. 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. 2, pp. 953–963.
6. Ascione F., Bianco N., Iovane T., Mauro G.M., Napolitano D.F., Ruggiano A., Viscido L. A real industrial building: modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 29, Article number 101186.
7. Redko A.F., Bolotskikh N.N. Sovershenstvovanie sistem otopleniya proizvodstvennykh pomeshcheniy gazovymi trubchatymi infrakrasnymi nagrevatelyami [Improving heating systems for industrial premises with gas tubular infrared heaters]. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 2010, vol. 74, no. 4, pp. 36–47.
8. Bukhmirov V.V., Solnyshkova Yu.S., Prorokova M.V., Bolotskikh N.N. Experimental research of heating system with infrared emitters. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2011, no. 3, pp. 12–16. In Rus.
9. Smykov A.A. Thermal regime of external enclosing constructions in buildings with lumid heating systems based on infrared radiators. *Science. Thought: electronic periodic journal*, 2017, no. 5, pp. 5–8. In Rus.
10. Kurilenko N.I., Chekardovskiy M.N., Mikhaylova L.Yu., Ermolaev A.N. Povyshenie koeffitsienta poleznogo deystviya luchistyoy

- sistemy otopeniya s primeneniem v kachestve otopitelnykh priborov «svetlykh» gazovykh infrakrasnykh izluchateley [Increasing the efficiency of a radiant heating system using «light» gas infrared heaters as heating devices]. *Inzhenerny vestnik Dona*, 2015, vol. 38, no. 4, pp. 73–82.
11. Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A., Solnyshkova Yu.S. Algorithm for solution of radiant heating premises systems. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2010, no. 4, pp. 1–3. In Rus.
  12. 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, Article number 01033.
  13. 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, pp. 291–300.
  14. Ghasemi M., Toghraie D., Abdollahi A. An experimental study on airborne particles dispersion in a residential room heated by radiator and floor heating systems. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 32, Article number 101677.
  15. Borisov B.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Vyatkin A.V. Thermal conditions of the local working area heated by a gas infrared heater under the mixed convection state. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2211, Article number 012022.
  16. Borisov B.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Vyatkin A.V. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2057, Article number 012125.
  17. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Kurilenko N.I., Voloshko I.V. 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 Rus.
  18. Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Voloshko I.V., Gutareva N.Y., Kurilenko N.I. Experimental determination of the worker's clothing surface temperature during the ceramic gas heater operation. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 22, Article number 100851.
  19. *DOE Fundamentals handbook – thermodynamics, heat transfer and fluid flow*. USA, US Department of Energy, 2016. Vol. 2, 80 p.
  20. Hesaraki 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, Article number 101661.

Received: 25 November 2022.

Reviewed: 8 January 2023.

#### Information about the authors

**Boris V. Borisov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander V. Vyatkin**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Geniy V. Kuznetsov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vyacheslav I. Maksimov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Tatiana A. Nagornova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.



УДК 553.98:550.836

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРИТОКА НЕФТИ ИЗ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Бычков Денис Андреевич<sup>1,2</sup>,  
dab30@tpu.ru

Зятиков Павел Николаевич<sup>1,3</sup>,  
z Pavel@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> АО «ТомскНИПИнефть»,  
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность.** Западно-Сибирский регион на сегодняшний день является одним из самых крупных нефтегазоносных провинций в России, но проблема снижения добычи проявляется там все чаще. Данное явление провоцируют различные причины, однако наиболее частыми являются такие, как понижение проницающей способности пласта и коэффициента продуктивности вследствие различных осложнений процесса нефтедобычи в призабойной зоне пласта. Вследствие этого появляется необходимость проведения работ по увеличению или восстановлению фильтрационно-емкостных свойств пласта. Активное применение на месторождениях Западной Сибири получил метод кислотной обработки продуктивных коллекторов, который способствует интенсификации притока нефти в скважину. Однако значительная часть обработок не дает положительных результатов. Повышение эффективности кислотных обработок скважин – одна из главных задач нефтедобычи на сегодняшний день, что в значительной степени определяет актуальность данного исследования.

**Целью** работы является анализ целесообразности проведения соляно-кислотной обработки призабойной зоны пласта месторождения, а также определение наиболее подходящего метода обработки для карбонатных пластов конкретного месторождения Западной Сибири.

**Результаты.** Исследованы принципы воздействия и особенности проведения соляно-кислотной обработки для коллекторов карбонатного строения, а также обоснован выбор и целесообразность применения технологии в данных условиях.

### Ключевые слова:

геолого-технические мероприятия, карбонатный коллектор, соляно-кислотная обработка под давлением, соляно-кислотный раствор, ингибитор, интенсификатор соляной кислоты, опрессовка скважин.

### Введение

Наибольшей эффективности при разработке карбонатных коллекторов можно достичь, применив соляно-кислотную обработку в призабойной зоне пласта, тем самым повысив интенсивность добычи. Главная задача соляно-кислотной обработки (СКО) – увеличение проницающей способности пласта в призабойной зоне. На сегодняшний день процессы СКО постоянно совершенствуются, что делает данную технологию достаточно перспективной с точки зрения разработки месторождений преимущественно с карбонатным типом коллектора. Эффект от единичного применения данной технологии на Западно-Сибирских месторождениях за 2018–2021 гг. в среднем составил от 185 до 240 т дополнительно добытой нефти. При исследовании технологии СКО было определено, что максимальной эффективности процесс достигает в случае обводненности нефтеносного пласта до 55 %. Но, если обводненность превышает данные показатели, эффективность применения данной технологии быстро понижается и становится нецелесообразной с экономической точки зрения [1].

СКО применяется для растворения частиц, засоряющих фильтры в призабойной зоне пласта, а также

очистки НКТ от соляных и парафинистых налипших частиц и коррозионных элементов. «Под воздействием кислот в карбонатных коллекторах образуются каверны – каналы растворения, за счет которых увеличивается проницаемость в нефтеносных пластах месторождения. Таким образом, увеличивается производительность извлечения углеводородов и мощности нагнетающей скважины.

Применяют следующие разновидности СКО:

- кислотные ванны;
- простые кислотные обработки;
- кислотные обработки под давлением;
- пенокислотные» [2. С. 253–254].

Приведенные методы СКО предназначены для очистки открытого интервала забоя скважины и ее стенок. Данная технология эффективна против различных глинистых и цементных образований, смолистых и кальциевых отложений, загрязнений фильтра в зоне продуктивных пластовых вод. Также активно применяют СКО после проведения плановых и внеплановых ремонтных работ с целью увеличения проницающей способностью нефтеносного пласта. Все приведенные процессы сопровождаются продавливанием смеси СКО в пласт.

Эффект от применения СКО и повышение его свойств напрямую зависит от времени, в течение которого находится в пласте соляно-кислотная смесь, а также от объёма закачанного реагента и его концентрации. В среднем время СКО может варьироваться от 8 часов до суток без учета времени протекания реакции с пластовой породой. Если пластовое давление в продуктивной зоне низкое, а толщина этого пласта высокая, то применяют пенокислотную обработку, так как данный раствор эффективнее растворяет отложения и обеспечивает высокое проникновение кислоты в пласт, тем самым обеспечивая глубокую обработку и растворение карбонатных образований и отложений. Пена образуется в процессе аэрации, которая осуществляется в специализированном аппарате-аэраторе. Аэрация – это процесс смешения жидкости и газа, который сопровождается образованием пены. Кислота аэрируется, и полученная пена вместе с ПАВ поступает в призабойную зону.

Достоинства пенокислотной обработки:

- аэрированная кислота медленно растворяет отложения карбонатного и цементного характера, за счет чего увеличивается проникающая способность кислоты в нефтеносные пласты, таким образом, обрабатывая отдаленные от скважины зоны;
- пена из смеси кислоты и ПАВ обладает показателем плотности от 400 до 800 кг/м<sup>3</sup>, а также повышенной вязкостью, за счет чего взаимодействует со всем объемом продуктивного нефтеносного пласта, что облегчает работу и извлечение углеводородов в условиях пониженного давления и высокой толщины пластов;
- за счет наличия в пене ПАВ понижается поверхностное натяжение рабочей смеси при контакте с пластовой жидкостью, так как сжатый газ при понижении давления расширяется, тем самым охватывая всю возможную площадь продуктивного пласта.

Приведенные достоинства улучшают показатели притока пластовой жидкости в скважину, поэтому данный вид обработки проводится с небольшими интервалами и его главной целью является увеличение площади охвата рабочих пластов.

Существуют комбинированные обработки термодисперсионной и термохимического характера, которые в совокупности воздействуют на призабойную зону пласта, очищая ее от смолистых и парафинистых отложений.

Подобные виды обработки проводятся в различных условиях, которые меняются в зависимости от типа месторождения или скважины, а также при разнообразии свойств нефтеносных пластов и пород, из которых они состоят. Работы для повышения проницаемости пласта могут проводиться в условиях, зависящих от состава пластовой жидкости, наличия в ней газообразных продуктов, показателей процесса, таких как температура, давление и вязкость. Вид скважин на месторождении также влияет на выбор технологии, так как необходимо увеличить проницаемость пласта в призабойной зоне перед началом процесса добычи углеводородов [3-6].

Для того чтобы технология обработки оставалась универсальной, был разработан целый ряд составов, которые будут удовлетворять тем или иным условиям процесса, которые являются особенными для каждого месторождения и скважины.

В процессе обработки открытого ствола скважины более эффективным способом воздействия на тяжелые отложения и частицы является смесь кислот фтористоводородной и соляной в кислотных ваннах.

Опираясь на результаты исследований, можно сделать вывод, что, проводя обработку на разных месторождениях при различных условиях, но по определенной технологической последовательности схем, эффект получается аналогичным. Цель процесса выражается в снижении давления в насосных агрегатах, а значит и в повышении результата данной обработки. Это один из самых эффективных процессов для достижения максимального снижения давления в оборудовании – насосном или компрессорном, за счет добавления кислоты и продавливания ее в скважину.

При вскрытии карбонатных пород используют глубокую обработку посредством соляной кислоты, которая оказывает воздействие на остаточные образования в стенках скважины. Данная технология построена на чередовании в скважине соляной кислоты и высоковязкой жидкости, которые предназначены для смачивания, а затем покрытия пленкой породы, которая будет защитой от СКО.

Для того чтобы повысить интенсификацию притока нефти, следует расширить или произвести открытие различных микротрещин в исследуемых пластах коллекторов. Произвести это можно двумя способами: при заполнении трещин веществом с высокой плотностью или без закупоривания трещин. Учитывая простоту использования раствора, лучше всего подходит метод использования материала КГРП (кислотный гидроразрыв пласта). На процесс растворения влияют следующие факторы: неоднородность состава породы и химическое воздействие.

Высокие скорости закачки раствора позволяют достичь эффекта в виде гидроразрыва пласта, а большие объемы закачиваемого раствора позволяют обработать удаленные участки пласта. Для большего результата используют разные химические вещества, такие как: водные вещества (поверхностно-активные), смешанные вещества с кислотами, а также соляную кислоту с растворами для порционной закачки.

Удобство использования КГРП обусловлено его применением на большинстве нефтяных месторождений. При этом степень эффективности зависит от применения нужного технического плана, при разработке которого необходимо учесть: правильную организацию проведения работ, достаточное количество вкладов и специфику характеристик залежей. Основной целью является очистка от нефтяных остаточных соединений из пласта при помощи воздействия кислотных химических реакций. Очистку производят, учитывая давление, т. к. продукт удаляется самостоятельно либо при помощи насосов (струйный или погружной).

В случаях низкого давления в пластах породы применяют очистку с диоксидом углерода (в жидком состоянии для быстрой очистки от нефтяных продуктов). Реакция протекает по схеме: при падении давления диоксид переходит в газообразное состояние, происходит вспенивание жидкости и вместе с пеной мелкодисперсные отходы выносятся на поверхность скважины.

#### **Целесообразность применения СКО на месторождении Западной Сибири с карбонатным типом коллекторов**

Использование соляной кислоты обусловлено восстановлением свойств, повышением фильтрационных характеристик призабойной зоны пласта, минимизацией обводнения скважин при эксплуатации – это главные задачи обработки призабойных участков скважин. Можно выделить два условия для достижения цели:

- 1) повышение количества добываемой нефти в скважинах;
- 2) минимизировать в скважинах способы появления воды.

Учитывая характеристики карбонатных слоев в их добывающих коллекторах, можно применять кислоту в неограниченном количестве и наблюдать химические реакции:

- при работе с известняковыми породами:  
 $2\text{HCl} + \text{CaCO}_3 = \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ ;
- при работе с доломитовыми породами:  
 $4\text{HCl} + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$ .

#### **Определение эффективности обработки соляной кислотой призабойных участков. Выбор подходящего объекта для обработки кислотой призабойного участка**

Для увеличения эффективности солянокислотной обработки необходимо получить сведения о глубине повреждения пласта путём проведения исследований. При кислотной обработке следует оценить несколько характеристик, поэтому испытания так важны. Керны или обломки выбуренной породы дают сведения о пористости, проницаемости и насыщенности пласта водой и нефтью. Образец сырой нефти из пласта можно также проверить на склонность к эмульгированию. Если сырая нефть образует эмульсии либо со свежей, либо с отработанной кислотой следует добавлять соответствующие деэмульгаторы.

Большое значение имеет способность силикатного компонента к увеличению (расширению) в породе. Встречаются примеры, когда частицы в несколько раз увеличивали свои размеры. Например, частицы из глины могут не только уменьшить диаметр канала коллектора, но и заблокировать его продуктами реакции, находясь во взаимодействии с соляной кислотой. Для предотвращения подобного набухания усиливают контроль над силикатами, повышая их концентрацию, при условии, что предварительные тесты укажут на наличие в породе свойств на увеличение объемов, во избежание последующих возможных повреждений коллекторов.

Требуется тщательно подбирать скважины, учитывая все условия, в том числе термодинамические,

состояние как самой скважины, так и породы, наличие и состав жидкости, взаимодействие с СКО, для того чтобы повысить эффективность обработки соляным раствором. Следует произвести расчет заключительного этапа обработки, выраженного в соотношении  $K_2/K_1$ , где  $K_1$  – предшествующие месяцы обработки;  $K_2$  – последующие месяцы обработки и их продуктивность, просчитывая месяцы нерегулярных испытаний.

Факторы, снижающие эффективность СКО:

- влияние нефтенасыщенной толщины пласта и глубины, значение проницаемости, свойства породы (пористость), количество пластов, прошедших обработку, вязкость;
- эксплуатационные факторы (дебит скважины по жидкости до обработки, дебит скважины по нефти до обработки, обводненность добываемой продукции);
- расчет оптимальной концентрации соляной кислоты, определение химических добавок в состав, производительность скважины – характеризуются как технические условия (факторы).

Для определения начальных параметров для обработки следует собрать все данные для расчета и анализа влияния каждого параметра на изменение технологического эффекта, а также химического взаимодействия. Затем на основе всех собранных показателей построить модель или график взаимодействия с породой, обязательно учитывая каждый фактор.

Качественный анализ результатов показывает, что к росту эффективности СКО приводит: увеличение эффективной толщины пласта, повышение удельного расхода раствора кислоты на метр продуктивной толщины пласта, концентрация закачиваемого раствора кислоты, число обрабатываемых пропластков и уменьшение плотности и вязкости нефти, кратность обработок, содержание серы, парафинов, асфальтено-смолистых веществ, проницаемость и пористость пласта.

При подборе скважин-кандидатов для СКО необходимо знать следующие параметры:

- геологические, физические и промысловые исследования и их интерпретация;
  - характеристика пород коллектора;
  - свойства глинистого раствора;
  - пластовое давление и остаточные запасы нефти.
- Отрицательными факторами для СКО являются:
- близкое расположение подземных источников воды;
  - снижение давления, в пластах превышающее 60–70 % от начального давления;
  - попадание даже минимального количества воды в скважину из водоносных горизонтов;
  - нарушения в обсадной колонне и отсутствие возможности изоляции от обрабатываемого интервала.

#### **Эффективность применения обработки призабойной зоны скважин соляной кислотой на месторождении Западной Сибири с карбонатным типом коллектора**

На месторождении Западной Сибири с карбонатным типом коллектора для обработки призабойных

участков скважин используют метод кислотной очистки, т. к. этот метод повышает коэффициент добычи нефти и поднимает проницаемость скважин. Во всех нефтедобывающих компаниях широко используется применение обработок посредством соляной кислоты.

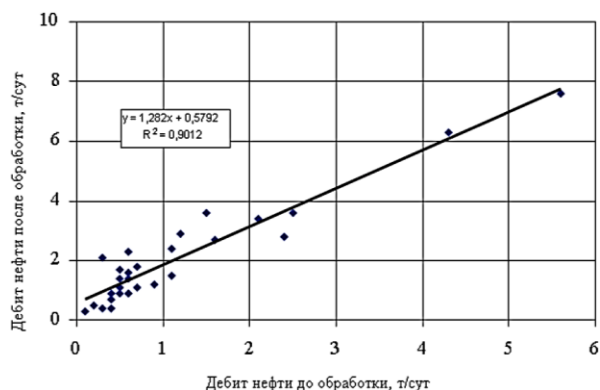
Эффективность проведения кислотных обработок призабойной зоны скважин в компании «Х» за 2021 г. представлена в табл. 1.

**Таблица 1.** Эффективность проведения соляно-кислотных обработок призабойной зоны пласта на месторождении с карбонатным типом коллекторов [7, 8]

**Table 1.** Efficiency of hydrochloric acid treatment of bottomhole formation zone at a deposit with a carbonate type of reservoirs [7, 8]

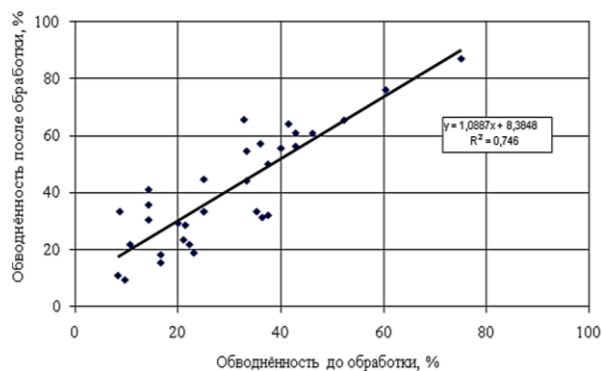
Номер скважины Well no.	До обработки соляной кислотой Before treatment with hydrochloric acid		После обработки соляной кислотой After treatment with hydrochloric acid		Продолжительность эффекта, сут. Effect duration, day	Объем доп. добычи, т Additional production volume, tons
	Q <sub>н</sub> , т/сут. Oil flow rate, t/day	Обводненность, % Water content, %	Q <sub>н</sub> , т/сут. Oil flow rate, t/day	Обводненность, % Water content, %		
357	2,6	59,2	3,7	62	174	364
1164	0,5	9,8	1,6	15	196	381
783	0,7	47,0	1,5	51	210	384
2353	1,6	33,0	2,35	65,1	153	295
1021	0,2	16,8	1,65	25,9	149	435
Среднее значение Average value	1,11	33,31	2,22	43,52	176,4	372

Анализ результатов 110 обработок, проведенных на скважинах за 2021 г., позволил получить зависимости обводненности после СКО от обводненности до СКО и зависимость дебита нефти после СКО от дебита нефти до СКО. Полученные зависимости представлены на рис. 1, 2.



**Рис. 1.** Зависимость дебита скважины после обработки СКО от дебита скважины до обработки

**Fig. 1.** Dependence of the well flow rate after acid treatment on the well flow rate before treatment



**Рис. 2.** Зависимость обводненности продукции после обработки СКО от обводненности до обработки

**Fig. 2.** Dependence of the water content of products after acid treatment on the water content before treatment

Полученные зависимости описываются уравнениями:

$$q_n^п = 1,182 * q_n^{до} + 0,5792, \quad (1)$$

$$W^п = 1,0887 * W^{до} + 8,3848, \quad (2)$$

где  $q_n^{до}$  – дебит скважин до проведения СКО;  $q_n^п$  – дебит скважин после проведения СКО;  $W^{до}$  – обводненность продукции до проведения СКО;  $W^п$  – обводненность продукции после проведения СКО,

Полученные уравнения связи (1), (2) позволяют по известным значениям дебита нефти и обводненности до обработки просчитывать дебит нефти и обводненность после обработки.

Повышение эффективности кислотной обработки скважины связано с увеличением глубины проникновения в кислотный пласт. Это можно сделать следующими способами:

- увеличение скорости впрыска кислоты;
- применение ингибиторов в реакции;
- снижении концентрации кислот.

Для того чтобы уменьшить реактивность кислоты по отношению к породе и тем самым увеличить глубину ее проникновения, концентрация кислоты поддерживается в пределах 12 %. Этот способ также облегчает перемещение продуктов реакции в удаленные зоны коллектора, за пределы зоны ствола скважины. В случае если кислота менее активна по отношению к металлу НКТ при концентрации соляной кислоты более 15 %, нейтрализованный раствор соляной кислоты получается более вязким, что затрудняет его удаление из пор пласта.

Кислота замедленного действия предназначена для воздействия на призабойную зону карбонатного пласта с целью повышения продуктивности нефтяных добывающих скважин и представляет собой состав, содержащий хлористый алюминий и ингибированную соляную кислоту в соотношении 30:1. Такая композиция используется для большего радиуса воздействия и увеличения глубины проникновения в пласт породы. При этом дебит нефти в разрабатываемой скважине должен быть от 0,5 т в сутки и содержать процентное содержание воды в пределах 45–55 %. Обработка производится в карбонатных и тер-

ригенных коллекторах с минимальным содержанием (10 %) карбоната, с использованием соляной кислоты. Количество обработок призабойной зоны соляной кислотой больше, чем при обработке кислотой замедленного действия, дополнительная добыча нефти в среднем выше при обработке. Установлено, что обработка соляной кислотой позволяет получить достаточно длительный эффект от проведенной операции. Стоит также заметить, что с увеличением дополнительной добычи нефти также увеличилась обводненность из-за повышенной проницаемости призабойной зоны скважины [9–12].

В каждой скважине продуктивный пласт имеет различные фильтрационные свойства, такие как проницаемость, пористость, поэтому и эффект от проведенной СКО для каждой скважины будет разным. Поэтому при выборе скважин-кандидатов следует учитывать накопленный опыт по применению СКО на призабойную зону скважин [13–16].

**Прогноз применения обработки призабойной зоны скважины соляной кислотой на месторождении «Х» с карбонатным типом коллектора**

Рассмотрим проведение СКО в добывающей скважине № 1270 месторождения «Х». Данная скважина работает с дебитом 1,5 т/сут., имеет фактическую глубину 1227 м, а обрабатываемый кислотой интервал продуктивного пласта составляет 6 м.

Внутренний диаметр обсадной колонны  $D_{обс}=0,15$  м, диаметр НКТ  $d_{нкт}=0,062$  м. Текущий дебит нефти  $q_{до}=0,6$  т/сут, текущая обводненность  $W=31$  %; проницаемость при  $dP=8$  МПа составляет  $520 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Расчет количества химикатов и воды:

По табл. 2 на приготовление  $10 \text{ м}^3$  10 % соляно-кислотного раствора требуется 3890 кг 27,5 % HCl и  $6,6 \text{ м}^3$  воды, а на 10 % соляно-кислотного раствора необходимо  $8,77 \text{ м}^3$  концентрированной HCl.

Рассчитаем необходимое количество реагентов, входящих в состав соляно-кислотного раствора.

**Таблица 2.** Количество кислоты и воды для приготовления соляно-кислотного раствора

**Table 2.** Amount of acid and water for preparation of a hydrochloric acid solution

Объем разведенной кислоты, $\text{м}^3$ Divorced acid volume, $\text{m}^3$	Концентрация разведенной кислоты Concentration of diluted acid, %			
	8	10	12	14
6	1840/4,38	2330/3,96	2830/3,52	3320/3,40
8	2460/5,84	3110/5,28	3770/4,68	4400/4,16
10	3080/7,30	3890/6,60	4720/5,87	5560/5,14

Примечание: В числителе указано количество концентрированной кислоты, кг, а в знаменателе – количество воды [17].

Note: the numerator indicates the amount of concentrated acid, kg, and the denominator indicates the amount of water [17].

Количество концентрированной товарной соляной кислоты  $W_k$  для 10 % соляно-кислотного раствора:

$$W_k = \frac{AxW(B-z)}{Bz(A-x)},$$

где  $A$  и  $B$  – числовые коэффициенты (табл. 3),  $W$  – объем соляно-кислотного раствора.

$$W_k = \frac{214 \cdot 10 \cdot 8,77(226 - 27,5)}{226 \cdot 27,5(214 - 10)} = 3,52 \text{ м}^3.$$

**Таблица 3.** Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  [18]

**Table 3.** Values of  $A$  and  $B$  coefficients [18]

$z, x$	$B, A$	$z, x$	$B, A/B, A$
5,15–12,19	214,0	29,95–31,52	227,5
13,19–18,11	218,0	32,10–33,40	229,5
19,06–24,78	221,5	34,42–37,22	232,0
25,75–29,57	226,0	–	–

Примечание:  $x$  – концентрация соляно-кислотного раствора, %;  $z$  – концентрация товарной кислоты, %.

Note:  $x$  – concentration of hydrochloric acid solution, %;  $z$  – concentration of commercial acid, %.

В качестве ингибитора принимаем катионоактивный реагент – катион  $A$  в количестве 0,01 % объема кислотного раствора. Данный ингибитор является химическим веществом, имеющим хорошую замедляющую скорость коррозии. Поэтому ингибирование растворов кислот на месторождении «Х» проводят катионом  $A$ .

Против выпадения из соляно-кислотного раствора содержащихся в нем солей железа добавляем уксусную кислоту в количестве:

$$Q_y = \frac{bW}{c},$$

где  $b$  – процент добавки уксусной кислоты к объему раствора ( $b=f+0,8$ ;  $f$  – содержание в соляной кислоте солей железа, примем 0,7 %, тогда  $b=1,5$  %);  $W$  – объем соляно-кислотного раствора;  $c$  – концентрация уксусной кислоты (принимаем 80 %).

$$Q_y = \frac{(0,7+0,8) \cdot 8,77}{80} = 0,16 \text{ м}^3.$$

В товарной соляной кислоте второго сорта содержится примесь серной кислоты до 0,6 %, которая после реакции ее с углекислым кальцием образует гипс, выпадающий в виде кристаллов, закупоривающих поры пласта. Против выпадения гипса добавляем к соляной кислоте хлористый барий.

$$Q_{x.6} = 21,3W \left( \frac{ax}{z} - 0,02 \right),$$

где  $W$  – объем соляно-кислотного раствора;  $a$  – содержание  $\text{SO}_3$  в товарной соляной кислоте;  $x$  – концентрация соляно-кислотного раствора;  $z$  – концентрация товарной кислоты.

$$Q_{x.6} = 21,3 \cdot 8,77 \left( \frac{0,6 \cdot 10}{27,5} - 0,02 \right) = 37,02 \text{ кг} \approx 0,009 \text{ м}^3$$

(при плотности хлористого бария  $4000 \text{ кг/м}^3$ ).

В качестве интенсификатора для понижения поверхностного натяжения применяем препарат ДС (детергент советский), который одновременно является ингибитором и наиболее активным понизителем скорости реакции соляной кислоты с породой. Большое снижение (в несколько раз) скорости реакции способствует более глубокому проникновению кислоты в пласт. Необходимое количество ДС составляет 1–1,5 % объема соляно-кислотного раствора (принимаем 1 %)

$$W_{\text{инт}}=0,01 \cdot W=0,01 \cdot 8,77=0,0877 \text{ м}^3.$$

Конечное процентное содержание воды в нефти, при учете всех добавленных реагентов,

$$V=W-W_k-\Sigma Q,$$

где  $W$  – объем солянокислотного раствора;  $W_k$  – объем концентрированной товарной соляной кислоты ( $W_k=3 \text{ м}^3$ );  $\Sigma Q$  – суммарный объем всех добавок к солянокислотному раствору (уксусная кислота, хлористый барий, ДС)

$$\Sigma Q=0,16+0,009+0,0877=0,257 \text{ м}^3;$$

$$V=8,77-3-0,257=5,5 \text{ м}^3.$$

Полученный раствор объемом  $8,77 \text{ м}^3$  содержит  $0,257 \text{ м}^3$  добавок и  $5,513 \text{ м}^3$  воды. СКО проводится в соответствии со специальным планом, который утверждается главным инженером и главным геологом.

Порядок проведения работ:

- спустить НКТ со скошенным концом на глубину забоя; промыть скважину круговой циркуляцией водой объемом  $23,3 \text{ м}^3$ ;
  - спустить колонну НКТ с пакером и скошенным концом на глубину  $1310 \text{ м}$ , пакер на глубине  $1300 \text{ м}$ ;
  - посадить пакер;
  - произвести обвязку спецтехники; отпрессовать наземную коммуникацию на полторакратное ожидаемое рабочее давление;
  - произвести предварительную промывку скважины до забоя и определить приемистость;
  - закачать расчетный объем соляной кислоты  $8,77 \text{ м}^3$ ;
  - продавить соляную кислоту в пласт пластовой водой в объеме  $3 \text{ м}^3$ ;
  - выдержать скважину в течение 2–3 ч до полной нейтрализации кислоты в результате реакции с породой;
  - сорвать пакер, промыть скважину путем обратной промывки пластовой водой в объеме не менее  $12 \text{ м}^3$ ;
  - поднять пакер, спустить глубинно-насосное оборудование и ввести скважину в эксплуатацию [19, 20].
- Определим прогнозируемый дебит нефти после СКО:

$$q_n^n = 1,182q_n^{до} + 0,5792 = \\ = 1,182 \cdot 0,6 + 0,5792 = 2,181 \text{ т / сут.}$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Результаты промышленного тиражирования технологий кислотных обработок с применением отклоняющихся систем на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / С.С. Черепанов, Т.Р. Балдина, А.В. Распопов, А.П. Котов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 6 (330). – С. 19–28.
2. Андреев А.В. Совершенствование технологии солянокислотного воздействия на пласт на Дачном месторождении // Севергеоэкотех-2004: Матер. Международной молодежной научной конференции. – Ухта: Изд-во УхГТУ, 2004. – С. 253–255.
3. Глушенко В.Н. Кислотные обработки: составы, механизмы реакций, дизайн. – Уфа: АН РБ, Гилем, 2019. – 392 с.
4. Шпилов А.И. Новые кислотные составы для селективной обработки карбонатных порово-трещиноватых коллекторов // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 80–83.

Средняя продолжительность эффекта  $T_{\text{эф}}$  для СКО скважин компании «Х» – 10 месяцев, или 300 суток. Если считать падение дебита по нефти линейным, то дополнительная добыча за время продолжительности эффекта будет равной.

$$Q_{\text{длн}} = \frac{(q_n^n - q_n^{до})}{2} T_{\text{эф}} = \frac{(2,181 - 0,6)}{2} 300 = 236,6 \text{ т.}$$

Рассчитаем показатель обводненности после обработки, используя формулу (2):

$$W^n = 1,0887 \cdot W^{до} + 8,597 = \\ = 1,0887 \cdot 31 + 8,3848 = 26,6 \text{ \%}.$$

Эффект от проведения СКО, который будет постепенно снижаться в течение 10 месяцев, будет заключаться в увеличении дебита нефти до  $2,181 \text{ т/сут.}$  За это время дополнительная добыча нефти составит  $236,6 \text{ т}$ . Обводненность после обработки составит  $26,6 \text{ \%}$ .

## Заключение

При разработке месторождений в Западной Сибири абсолютным большинством нефтедобывающих компаний используется обработка методом, основанном на использовании соляной кислоты, для увеличения добычи сырой нефти в коллекторах преимущественно карбонатного строения. Анализ результатов проведения СКО показывает, что мероприятия по увеличению добычи нефти путем закачки соляной кислоты эффективно воздействуют на пласт при низкой обводненности (до  $55 \text{ \%}$ ) и средне-суточных дебитах скважин от  $0,2$  до  $2,6 \text{ т/сут.}$

Для скважины № 1270 необходимо применение раствора соляной кислоты, объем которой должен составлять порядка  $3 \text{ м}^3$  концентрированной соляной кислоты,  $5,513 \text{ м}^3$  воды и  $0,257 \text{ м}^3$  добавок:  $0,16 \text{ м}^3$  уксусной кислоты,  $0,009 \text{ м}^3$  интенсификатора,  $0,0877 \text{ м}^3$  хлористого бария.

Этот расчет демонстрирует технологическую эффективность обработки соляной кислотой, которая заключается в увеличении дебита нефти на  $27,5 \text{ \%}$  после проведенного мероприятия, что сопровождается положительным экономическим эффектом. Дополнительная добыча за время действия эффекта (~300 сут.) составила  $237 \text{ т}$ . Содержание воды после проведения СКО составляет  $26,6 \text{ \%}$ .

5. Пестриков А.В., Политов М.Е. Самоотклоняющиеся кислотные системы на основе вязкоупругих ПАВ: эксперимент и модель // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 4. – С. 529–562.
6. Телин А.Г. Комплексный подход к увеличению эффективности кислотных обработок скважин в карбонатных коллекторах // Нефтегазовое дело. – 2021. – № 8. – С. 69–74.
7. Albuquerque M., Smith Ch. Eight success cases of VDA application in large limestone reservoir in the Caspian region, Texas // Journal of Petroleum and Mining Engineering. – 2018. – V. 21. – P. 171–175.
8. 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. – V. 01. – P. 45–48.
9. Acid placement: an effective VES system to stimulate high-temperature carbonate formations, Qatar / A.M. Gomaa, J. Cutler, Qu Qi, E. Cawiezel Kay // International Production and Operations Exhibition. – 2019. – V. 558. – P. 6–18.

10. Taylor D., Kumar P.S. Viscoelastic surfactant based selfdiverting acid for enhanced stimulation in carbonate reservoirs, India // The latest ways to increase oil production. – 2018. – V. 58. – P. 667–668.
11. Zhou Fujian, Liu Yuzhang, Zhang Shaoli. A novel diverting acid stimulation treatment technique for carbonate reservoirs, China // Oil industry development prospects China. – 2019. – V. 912. – P. 1637–1668.
12. Case study of a novel acid-diversion technique in carbonate reservoirs, Canada / F.F. Chang, T. Love, C.J. Affeld, J.B. Blevins, R.L. Thomas, D.K. Fu // Annual Technical Journal and Exhibition. – 2021. – V. 11. – P. 37–48.
13. Paccaloni G., Tambini M. Advances in matrix stimulation technology, Canada // Journal of petroleum technology. – 2022. – V. 121. – P. 457–458.
14. Taylor D. Geotechnological features of oil recovery in carbonate reservoirs, India // Results of development in the petrochemical industry. – 2018. – V. 21. – P. 57–68.
15. Kalfayan L.J., Martin A.N. The art and practice of acid placement and diversion: history, Present State and Future // Annual Technical Journal in New Orlean. – 2009. – V. 02. – P. 177–188.
16. Paccaloni G. A new, effective matrix stimulation diversion technique, Texas // Journal of Drilling&Completion. – 2022. – V. 12. – P. 77–89.
17. Smith C.L., Anderson J.L., Roberts P.G. New diverting techniques for acidizing and fracturing and fracturing, India // Petroleum Research. – 2008. – V. 08. – P. 898–904.
18. Optimization of acid stimulation for a loosely consolidated Brazilian carbonate formation – multidisciplinary laboratory assessment and field implementation, Brazilia / B.R. Lungwitz, R.L. Hathcock, K.R. Koerner, D.M. Byrd, M.J. Gresko, R.A. Skopec, J.W. Martin, C.N. Fredd, G.D. Cavazzoli // Journal of Petroleum & Engineering – 2016. – V. 18. – P. 988–1001.
19. Stimulation for a loosely consolidated Brazilian carbonate formation – multidisciplinary laboratory assessment and field implementation, Brazilia // Journal of Petroleum & Engineering. – 2016. – V. 18. – P. 564–578.
20. Quantitative analysis of reaction-rate retardation in surfactant-based acids, Qatar / H.A. Nasr-El-Din, A.M. Al-Mohammad, A.D. Al-Aamri, M.A. Al-Fahad, F.F. Chang // Journal Production & Operations. – 2021. – V. 38. – P. 1054–1065.

*Поступила: 12.11.2022 г.*

*Прошла рецензирование: 23.12.2022 г.*

#### **Информация об авторах**

**Бычков Д.А.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; младший научный сотрудник отдела проектирования разработки АО «ТомскНИПИнефть».

**Зятиков П.Н.**, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; ведущий научный сотрудник Механико-математического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.98:550.836

## INTENSIFICATION OF OIL INFLOW FROM CARBONATE RESERVOIRS FOR THE CONDITIONS OF THE WESTERN SIBERIA FIELDS

**Denis A. Bychkov**<sup>1,2</sup>,  
dab30@tpu.ru

**Pavel N. Zyatikov**<sup>1,3</sup>,  
zpavel@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> JSC «TomskNIPIneft»,  
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** The West Siberian region is currently one of the largest oil and gas provinces in Russia, but the problem of declining production is becoming more frequent there. This phenomenon is caused by various reasons, however the most frequent ones are such as lowering of formation permeability and productivity factor due to various complications of oil production in the bottomhole zone (bottomhole formation zone). As a result, it becomes necessary to carry out work to increase or restore the filtration-capacitance properties of the reservoir. The method of acid treatment of productive reservoirs, which contributes to the intensification of oil inflow into the well, has been actively used in the fields of Western Siberia. However, a significant part of the treatments does not give positive results. Improving the efficiency of acid treatments of wells is one of the main tasks of oil production today, which largely determines the relevance of this study.

**The purpose** of this work is to analyze the degree of expediency of hydrochloric acid treatment in the field and determine the most appropriate method of treatment for carbonate reservoirs of the West Siberian field.

**Results.** The principle of effect and peculiarities of the hydrochloric acid treatment for reservoirs of carbonate structure was studied. The choice and expediency of application of the technology in these conditions was substantiated.

### Key words:

geological and technical measures, carbonate reservoir, hydrochloric acid treatment under pressure, hydrochloric acid solution, inhibitor, hydrochloric acid intensifier, wells pressure testing.

### REFERENCES

1. Cherepanov S.S., T.R. Baldina, A.V. Raspopov, A.P. Kotov. Rezultaty promyshlennogo tirazhirovaniia tekhnologii kislotnykh obrabotok s primeneniem otkloniaushchikhsia sistem na mestorozhdeniakh OOO «LUKOIL- PERM» [Results of industrial replication of acid treatment technologies by using deflection systems at the deposits of LLC «LUKOIL-PERM»]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefiannykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2019, no. 6 (330), pp. 19–28.
2. Andreev A.V. Sovershenstvovanie tekhnologii solyano-kislotnogo vozdeystviya na plast na Dachnom mestorozhdenii [Improving the technology of hydrochloric acid exposure to the formation at the Dachnoye deposit]. *Mezhdunarodnaya molodozhnaya nauchnaya konferentsiya. Severgeoeokotek* [International Youth Scientific Conference. Severgeoeocotech]. Novosibirsk, 2020. pp. 253–255.
3. Glushchenko V.N. *Kislotnye obrabotki: sostavy, mekhanizmy reaktivov, dizain* [Acid treatments: compositions, reaction mechanisms, design]. Ufa, AN RB, Gilem Publ., 2010. 392 p.
4. Shipilov A.I. Novey kislotnye sostavy dlya selektivnoy obrabotki karbonatnykh porovo-treshchinovatykh kollektorov [New acid compositions for selective treatment of carbonate reservoir]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2012, no. 2, pp. 80–83.
5. Pestrikov A.V., Politov M.E. Samootklonyayushchiesya kislotnye sistemy na osnove vyazkouprugikh PAV: eksperiment i model [Self-diverting acid systems based on viscoelastic surfactants: experiment and model]. *Neftgazovoe delo*, 2013, no. 4, pp. 529–562.
6. Telin A.G. Kompleksny podkhod k uvelicheniyu effektivnosti kislotnykh obrabotok skvazhin v karbonatnykh kollektorakh [An integrated approach to increasing the efficiency of acidizing wells in carbonate reservoirs]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2001, no. 8, pp. 69–74.
7. Albuquerque M., Smith Ch. Eight success cases of VDA application in large limestone reservoir in the Caspian region. *Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 21, pp. 171–175.
8. Alleman D., QiQu, KeckR. 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.
9. Goma A.M., Cutler J., Qu Qi, Cawiezel K.E. Acid placement: an effective VES system to stimulate high-temperature carbonate formations. *International Production and Operations Exhibition*, 2019, vol. 558, pp. 6–18.
10. Taylor D., Kumar P.S., Fu D. Viscoelastic surfactant based self-diverting acid for enhanced stimulation in carbonate reservoirs. *The latest ways to increase oil production*, 2018, vol. 58, pp. 667–668.
11. Zhou Fujian, Liu Yuzhang, Zhang Shaoli. A novel diverting acid stimulation treatment technique for carbonate reservoirs in China. *Oil industry development prospects China*, 2019, vol. 912, pp. 1637–1668.
12. Chang F.F., Love T., Affeld C.J., Blevins J.B., Thomas R.L., Fu D.K. Case study of a novel acid-diversion technique in carbonate reservoirs. *Annual Technical Journal and Exhibition*, 2021, vol. 11, pp. 37–48.
13. Paccaloni G., Tambini M. Advances in matrix stimulation technology. *Journal of petroleum technology*, 2022, vol. 121, pp. 457–458.
14. Taylor D. Geotechnological features of oil recovery in carbonate reservoirs, India. *Results of development in the petrochemical industry*, 2018, vol. 21, pp. 57–68.
15. Kalfayan L.J., Martin A.N. The art and practice of acid placement and diversion: history, present state and future. *Annual Technical Journal in New Orleans*, 2009, vol. 02, pp. 177–188.
16. Paccaloni G. A new, effective matrix stimulation diversion technique. *Journal of Drilling & Completion*, 2022, vol. 12, pp. 77–89.
17. Smith C.L., Anderson J.L., Roberts P.G. New diverting techniques for acidizing and fracturing and fracturing. *Petroleum Research*, 2008, vol. 08, pp. 898–904.



18. Lungwitz B.R., Hathcock R.L., Koerner K.R., Byrd D.M., Gresko M.J., Skopec R.A., Martin J.W., Fredd C.N., Cavazzoli G.D. Optimization of acid stimulation for a loosely consolidated Brazilian carbonate formation – multidisciplinary laboratory assessment and field implementation. *Journal of Petroleum & Engineering*, 2016, vol. 18, pp. 988–1001.
19. Al-Aamri A.D., Al-Fahad M.A. Stimulation for a loosely consolidated Brazilian carbonate formation multidisciplinary laboratory assessment and field implementation. *Journal of Petroleum & Engineering*, 2016, vol. 18, pp. 564–578.
20. Nasr-El-Din H.A., Al-Mohammad A.M., Al-Aamri A.D., Al-Fahad M.A., Chang F.F. Quantitative analysis of reaction-rate retardation in surfactant-based acids. *Journal Production & Operations*, 2021, vol. 38, pp. 1054–1065.

*Received: 12 November 2022.  
Reviewed: 23 December 2022.*

#### **Information about the authors**

**Denis A. Bychkov**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; junior researcher, JSC «TomskNIPIneft».

**Pavel N. Zyatikov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; leading researcher, National Research Tomsk State University.

УДК 553.94'493(574.3)

## МЕТАЛЛОНОСНЫЕ УГЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШУБАРКОЛЬ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАЗАХСТАН)

**Ибрагимова Диана Андреевна**<sup>1</sup>,  
podgornaya1992@mail.ru

**Арбузов Сергей Иванович**<sup>2,3</sup>,  
siarbuzov@mail.ru

**Портнов Василий Сергеевич**<sup>1</sup>,  
vs\_portnov@mail.ru

<sup>1</sup> Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,  
Республика Казахстан, 100056, г. Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>3</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,  
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159.

**Актуальность** работы обусловлена возможностью использования углей не только как энергетического топлива, но и как источник ценных элементов-примесей (Ge, Re, Ga, Nb, Zr, Hf, Y, Au, PЗЭ и др.). Особенно это касается токсичных примесей, так как значительное их количество накапливается в золошлаковых отходах, а ряд элементов выносятся с газовой фазой или золой-уносом в атмосферу, что влияет на загрязнение окружающей среды.

**Целью** работы является оценка содержания элементов-примесей и форм их нахождения в углях и золах углей месторождения Шубарколь.

**Объектами** исследования являются угли и углевмещающие породы Шубаркольского месторождения (Центральный Казахстан).

**Методы:** углепетрографические исследования; ИК-спектрометрические и пиролитические; инструментальный нейтронно-активационный анализ, масс-спектрометрический метод с индуктивно связанной плазмой, сканирующая электронная микроскопия с рентгеноспектральным анализом.

**Результаты.** Выявлено обогащение углей Шубаркольского месторождения PЗЭ, Sc, Co, Cs, Zr, Ag и Ba. Пласт 2B3 ( $A^d - 4,8\%$ ) отличается наибольшими содержаниями в разрезе Be, Sc, Co, Zr, Mo, W, Ag, Sb и U при повышенном по сравнению с кларком для угля содержанием V, Cs и Hg. Отдельные пласты (2B3 и 2B1), аномально обогащенные группой элементов и зола их углей, могут рассматриваться как редкометалльное комплексное оруденение. В золе угля пласта 2B3 выше минимально промышленных значений содержание группы металлов: Be (79,4 г/т), Sc (135 г/т), V (771 г/т), Co (493 г/т), Y (201 г/т), Zr (3328 г/т), Mo (130 г/т), Ag (5,4 г/т), Hf (63,5 г/т), сумма PЗЭ+Y (679 г/т). Выявлены минеральные формы редкоземельных элементов (циркон, бадделейт, монацит).

### **Ключевые слова:**

месторождение Шубарколь, уголь, зола угля, элементы-примеси, формы нахождения, редкие элементы.

### **Введение**

В связи с ростом спроса и масштабов добычи угля на месторождении Шубарколь (Центральный Казахстан) возникла необходимость оценки содержания элементов-примесей в углях и золе углей, что обусловило потребность в проведении специализированных исследовательских работ. Результаты исследований элементов-примесей в углях Шубаркольского месторождения участка Центральный-2 показали, что угли и зола углей характеризуются повышенным содержанием Be, Sc, Co, Zr, Mo, W, Ag, Sb и U при повышенных по сравнению с кларком для угля содержанием V, Cs и Hg.

В настоящее время опубликовано множество работ по изучению элементов-примесей в углях и золе углей, в которых говорится о промышленных концентрациях металлов. Особенно данная тема актуальна для стран с высоким уровнем угледобычи и большими ресурсами угля, таких как Китай, Россия, США, Австралия и другие. Наиболее хорошо изучена гер-

маниенность бурогоугольных месторождений, так как в настоящее время из углей попутно извлекают только германий. Месторождения подобного типа разрабатываются в Китае и на территории России, в Приморском крае. В Китае также извлекаются в промышленных масштабах Li и Ga [1, 2]. Редкоземельные элементы необходимы для разработки технологий эффективного использования энергии [3, 4]. Российские ученые выполняют комплексную оценку металлоносности углей многих месторождений [5–8]. В рассмотренных работах авторы выявили высокие, в том числе промышленно значимые, содержания ряда редких, в том числе редкоземельных элементов (Sc, Zr, Hf, Ta, Th, REE).

Проведенные ранее исследования по изучению угля в северной части Шубаркольского месторождения показали, что шубаркольский уголь обогащен группой редких элементов (Sc, Zr, Hf, Nb, Ta, REE), накопление которых обусловлено геохимической специализацией пород складчатого обрамления угле-

носных впадин, влиянием вулканизма и гидротермальных процессов на формирование угленосных отложений [9]. В работе [10] также была выявлена зависимость изменения минерального состава и содержания радиоактивных элементов в углях Центрального Казахстана от их возраста. Исследование токсичных элементов-примесей в углях месторождений Казахстана было проведено в работе [11].

Изучение минеральных форм элементов в углях и золах углей обусловлено необходимостью получения данных о возможности последующей разработки методов и технологий по их извлечению из углей [12–14].

В силу исторически сложившихся обстоятельств с наибольшей полнотой изучена металлоносность угольных бассейнов и месторождений бывшего СССР и Российской Федерации. Для большинства угольных месторождений Казахстана нет достоверных оценок среднего содержания в них элементов-примесей. Данным объектам посвящены фундаментальные обобщающие работы последней четверти прошлого века [15, 16], серии методических рекомендаций по оценке попутных компонентов. Эти работы являются основой для аналитического обзора металлоносности углей.

Геохимия углей Казахстана изучена недостаточно полно, изучение редких элементов углей стало проводиться относительно недавно. Месторождение Шубарколь разрабатывается с 1987 г. по настоящее время. Уголь отрабатывается в количестве 11,4 млн т в год, поставляется на промышленные предприятия, где в отвалах накапливаются отходы его сжигания [17, 18].

Авторами проведены исследования по изучению углей центральной части месторождения Шубарколь, в результате которых установлено, что угольные пласты 2В1 и 2В3 характеризуются аномальным, вплоть до промышленно значимого, содержанием группы ценных металлов. Настоящая работа посвящена анализу геохимических особенностей углей месторождения Шубарколь и оценке перспектив их комплексного использования

#### **Характеристика объекта исследования**

Месторождение Шубарколь представляет собой мульду юрского возраста, сформировавшуюся на дислоцированных отложениях палеозоя. В геологическом строении фундамента и чехла угленосной впадины принимают участие терригенно-карбонатные породы верхнего девона и нижнего карбона, терригенные породы раннекаменноугольного возраста, а также слабо литифицированные продукты выветривания мезозоя и рыхлые отложения кайнозоя (рис. 1).

Юрская угленосная толща сложена осадочными, в основном обломочными породами. Среди них преобладают алевролиты, аргиллиты, песчаники и угли. Остальные литологические разности представлены конгломератами, гравелитами, сидеритами и известняками. Песчаники характеризуются слабой сортировкой обломочного материала и малой степенью

окатанности зерен. Среди обломков преобладают вулканиты кислого состава, также присутствуют кремнистые породы, кварц и полевые шпаты. Кроме того, встречаются единичные зерна биотита, циркона, апатита, хлорита. У алевролитов состав обломочного материала примерно такой же, как и у песчаников. Они характеризуются лучшей сортировкой обломочного материала, имеющего угловатую окатанность зерен, наличием прослоев и линз аргиллитов и сидеритов. Цемент глинистый, обломки пород обычно серицитизированы. Аргиллиты сложены микрочешуйчатым агрегатом слюдисто-глинистых минералов с большим количеством углистого материала [17].

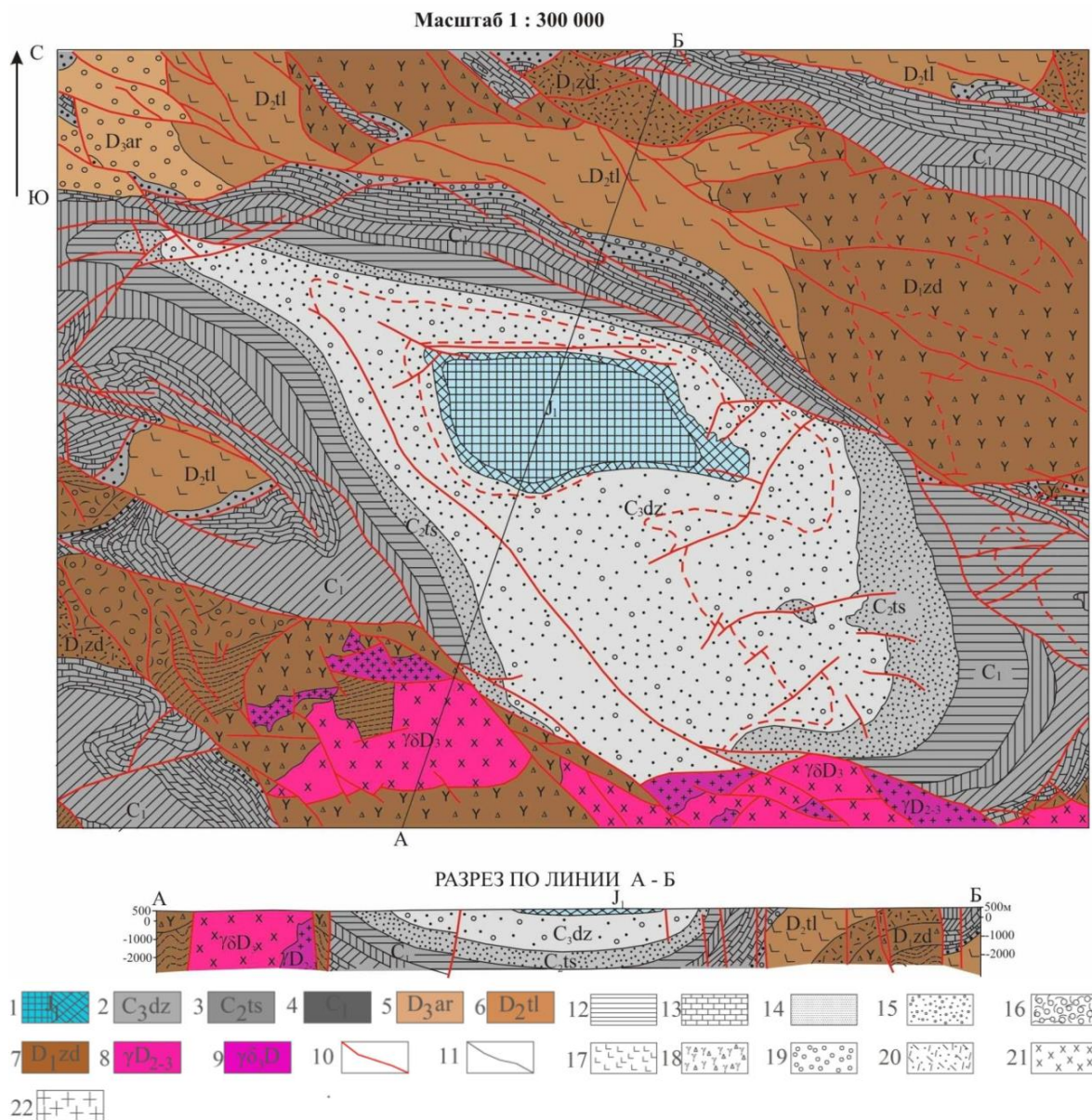
Вещественный состав аргиллитов характеризуется низкой кремнекислотностью ( $\text{SiO}_2$  – 51,9 %). Более высокие концентрации кремнезема встречаются в алевропесчаниках ( $\text{SiO}_2$  – 62,9 %), алевролитах ( $\text{SiO}_2$  – 59,8 %), песчаниках ( $\text{SiO}_2$  – 67,2 %) и их сидеритизированных разностях ( $\text{SiO}_2$  – 61,5 %). Также характерны невысокие содержания титана (<0,9 %  $\text{TiO}_2$ ), повышенные концентрации глинозема (15,1–21,5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и низкое содержание железа (0,76–1,57 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Содержания магния и кальция в целом отражают состав обломочного материала.

Угленосные отложения залегают с резким угловым несогласием на подстилающих терригенно-карбонатных с примесью туфового материала отложениях карбонового возраста. В формировании особенностей геохимического спектра элементов-примесей в углях и в накоплении их повышенных концентраций ведущую роль играет состав пород области сноса, терригенный материал которой неоднороден. На юге, юго-западе и юго-востоке района месторождения распространены тела гранитоидов, которые могут рассматриваться как источник накопления таких металлов, как Be, Rb, Cs, Li, лантаноидов и радиоактивных элементов. Проявление ториевой природы в изучаемом районе связано с кислыми и субщелочными гранитоидами. Также с гранитоидами связано вольфрамовое и молибденовое оруденение на юго-востоке района [9, 10].

На юге, востоке и западе распространены разновозрастные, преимущественно девонские, вулканогенные отложения неоднородные по составу: от риолитов до андезитбазальтов и базальтов. С вулканитами в этом районе связаны проявления полиметаллов гидротермальной природы.

На юго-западе от месторождения Шубарколь известны месторождения и проявления меди Джезказганского типа. Кроме того, район перспективен на выявление железо-марганцевых руд Атасуйского типа. На юге района расположены Fe-рудные месторождения Каражал и Ушкатын, комплексное Ba–Zn–Pb месторождение Жайрем [19, 20].

Распространенные здесь базальтоиды могут рассматривать как источник ванадия, скандия, кобальта, никеля и других сидерофильных и халькофильных черных и цветных металлов [18].



**Рис. 1.** Геологическая карта района месторождения Шубарколь (из отчета о детальной разведке Шубаркольского угольного месторождения, 1987 г. Карту составили В.Н. Завражнов, О.М. Володина). 1 – Нижняя юра ( $J_1$ ). Сероцветная угленосная толща – аргиллиты, алевролиты, песчаники, угли. А) Верхний угольный горизонт; Б) Нижний угольный горизонт; 2 – Верхний карбон, Дзержказанская свита ( $C_{3dz}$ ); 3 – Средний карбон, Таскудукская свита ( $C_{2ts}$ ); 4 – Нижний карбон ( $C_1$ ); 5 – Верхний девон Аиртауская свита ( $D_{3ar}$ ) – преимущественно терригенные отложения; 6 – Средний девон, Талдысайская свита ( $D_{2tl}$ ); 7 – Нижний девон, Желтымесская свита ( $D_{1zd}$ ); 8 – Теректинский комплекс ( $\gamma D_{2-3}$ ); 9 – Карамендинский комплекс ( $\gamma D_1$ ); 10 – геологические границы свит; 11 – тектонические нарушения; 12 – мергели, доломиты; 13 – известняки; 14 – песчаники, алевролиты; 15 – красноцветные и сероцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты с базальтными конгломератами в основании; 16 – песчаники и конгломераты с прослоями андезитовых порфиритов и туфы; 17 – андезито-базальты; 18 – туфы и лавы риолитов; 19 – алевролиты; 20 – породы кислого состава, преимущественно туфы; 21 – гранодиориты и кварцевые диориты; 22 – лейкократовые и биотитовые граниты

**Fig. 1.** Geological map of the Shubarkol deposit (from a detailed exploration report on the Shubarkol coal deposit, 1987, mapped by V.N. Zavrazhnov, O.M. Volodina). 1 – Lower Jurassic ( $J_1$ ). Grey-coloured coal-bearing strata-mudstones, siltstones, sandstones, coals. А) Upper coal horizon; Б) Lower coal horizon; 2 – Upper Carboniferous, Dzhezkazgan formation ( $C_{3dz}$ ); 3 – Middle Carboniferous, Taskuduk formation ( $C_{2ts}$ ); 4 – Lower Carboniferous, ( $C_1$ ); 5 – Upper Devonian, Airtausky formation ( $D_{3ar}$ ) – predominantly terrigenous sediments; 6 – Middle Devonian, Talldysai formation ( $D_{2tl}$ ); 7 – Lower Devonian, Zheltymes formation ( $D_{1zd}$ ); 8 – Terektinskiy complex ( $\gamma D_{2-3}$ ); 9 – Karamendinsky complex ( $\gamma D_1$ ); 10 – geological boundaries of formations; 11 – tectonic faults; 12 – marls, dolomites; 13 – limestones; 14 – sandstones, siltstones; 15 – red-coloured and grey-coloured sandstones, siltstones, claystones with basalt conglomerates at the base; 16 – sandstones and conglomerates with interlayers of andesite porphyrites and tuffs; 17 – andesite basalts; 18 – tuffs and lavas of rhyolite; 19 – siltstones; 20 – acidic rocks, predominantly tuffs; 21 – granodiorites and quartz diorites; 22 – leucocratic and biotite granites

Угли сосредоточены в трех горизонтах: Верхнем, Среднем и Нижнем. Угли гумусовые с редкой примесью сапропелевого материала, относятся к каменным, марки Д (длиннопламенные). Угли малозольные, малосернистые (0,4 %) с незначительным содержанием фосфора, легко- и среднеобогатимые. Теплота сгорания около 7,4 тыс. ккал/кг; выход летучих веществ на сухое состояние ( $V^{daf}$ ) от 11,0 до 39,0 %; толщина пластического слоя (Y) от 0 до 33 мм; показатель отражения витринита ( $R_0$ ) от 0,6 до 2,0 %; сумма фюзенизированных компонентов от 5,0 до 80,0 %; зольность на сухое состояние ( $A^d$ ) от 4,0 до 13,0 % [21].

Они представляют собой мощные сложные угольные залежи с изменяющимися по площади строением и мощностью. Верхний горизонт самый угленасыщенный (95 %) и мощный (рабочая мощность до 32 м), относительно однороден. Наиболее монолитный он в узле угленакопления на северо-западе мульды площадью около 10 км<sup>2</sup>. Коэффициент угленосности на юге мульды достигает 15 %. Для всех угольных горизонтов характерны в той или иной степени конседиментационные нарушения: расщепления, выклинивания и замещения. Важной особенностью всех изученных пластов является низкое содержание фосфора [17].

Верхний горизонт, залегающий по всему месторождению, состоит из трех основных пластов – 2В, 1В и В0. Пласт 2В является верхним и залегает примерно в 100 м от поверхности в северной части исследуемой площади. При объединении всех угольных пачек (2В1, 2В2, 2В3, 2В4) он изменяется в мощности от 13 до 22 м и залегает в своей завершенной форме в центрально-северном и северо-западном участках. На юге участка пласт расщепляется на четыре отдельных пласта, а именно 2В4, 2В3, 2В2 и 2В1. Пласт 2В залегает над пластом 1В на расстоянии до 15 м (в среднем 6–8 м), сам преимущественно разветвляется на 1В22, 1В21 и 1В1. При их объединении мощность пласта достигает 11,5 м при средней мощности 7,55 м. Нижний пласт из трех, пласт В0, является маломощным угольным пластом, максимальная мощность которого достигает 6 м. Пласт разветвляется на верхний и нижний дочерние пласты.

#### Методика исследования

Опробование углей выполнено по двум сечениям бороздовым методом, вкрест простирания угольных пластов в направлении от почвы к кровле. Длина бороздовой пробы колебалась в зависимости от мощности пласта от 0,1 до 1,0 м, ширина борозды – 0,05 м (рис. 2). Всего из угольных пластов и углевмещающих пород участка Центральный 2 Шубаркольского месторождения было отобрано в 12 пластопересечениях 107 проб, в том числе 75 проб угля, и 32 пробы из углевмещающих пород и партингов.

Изучение вещественного состава проводилось комплексом современных аналитических методов. Состав микроэлементов изучали методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС) на спектрометре Agilent 7700x (Agilent Techn., США) в аналитическом центре Дальневосточ-

ного геологического института ДВО РАН, г. Владивосток (зав. лабораторией Н.В. Зарубина). Одновременно для количественного анализа на редкоземельные, благородные и другие элементы использовался современный высокочувствительный нейтронно-активационный анализ (ИННА) с облучением тепловыми нейтронами на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т института Ядерной физики в лаборатории ядерно-геохимических методов исследования Томского политехнического университета (зав. лабораторией А.Ф. Судыко). Озольнение проб проводилось согласно ГОСТ 11022-95 при температуре 800±15 °С в научно-исследовательской лаборатории по комплексному использованию горючих полезных ископаемых НИ ТПУ (зав. лабораторией С.Г. Маслов).



Рис. 2. Опробование угольных пластов бороздовым методом

Fig. 2. Trenching of coal seams using the trenching method

Из каждой пробы отбирался образец для анализа на электронном микроскопе. В процессе исследований выполнено изучение минеральных фаз в 12 пробах угля и золы угля. Кроме того, исследован групповой состав угля с целью ориентировочной оценки роли органического вещества в концентрировании элементов-примесей. Микроминеральный состав изучался на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионным спектрометром Bruker X@Flash 4010/5010 для проведения рентгеноспектрального анализа в МИНОЦ «Урановая геология» при отделении геологии инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ (исполнитель С.С. Ильенко). Содержание ртути в угле и углевмещающих породах определяли методом беспламенной атомной абсорбции на приборе «РА-915+» с пиролизической приставкой «ПИРО-915» в МИНОЦ «Урановая геология», НИ ТПУ (исполнитель Н.А. Осипова).

Данный комплекс методов позволяет всесторонне изучить компоненты минерально-вещественного состава углей и углевмещающих пород. Опубликован ряд научных статей с данными, в которых представлены содержания микроэлементов в углях и вмещающих породах, определенные методом ИННА в сопоставлении с методом ICP MS [22, 23].

Для оценки среднего содержания использовался преимущественно расчёт средневзвешенного по мощности и, где необходимо, по зольности содержания элементов в углях и золах углей по сечениям опробования, применяемый при такого рода исследованиях, что позволяет получить более достоверные оценки средних содержаний в угольных пластах [24].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Содержание элементов-примесей в углях и золах углей

Использование методики оценки среднего как средневзвешенного [24] позволило нам получить надежные оценки среднего содержания элементов-примесей в углях Шубаркольского месторождения. Проведенные ис-

следования показали, что угли изученных угольных пластов (1B21, 1B22, 2B1, 2B2, 2B3) участка Центральный-2 месторождения Шубарколь, характеризуются низкой зольностью и отличаются низким содержанием основных золообразующих элементов (табл. 1). В целом все пласты характеризуются сходным алюмосиликатным составом золообразующих элементов с отчетливым преобладанием кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) и глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Кремний-алюминиевое отношение составляет 1,8, что указывает на терригенную природу зольности [25]. Исключением является нижний пласт 1B21, он отличается высокой железистостью. В пластах 2B3 и 1B21 зольность углей на уровне 2,6–2,7 %, можно рассматривать ее как аномально низкую.

Таблица 1. Среднее содержание основных золообразующих окислов в угольных пластах, %

Table 1. Average content of major ash-forming oxides in coal seams, %

Элементы/Elements	Пласты угля/Coal seams								Среднее/Average
	1B21	1B22	2B1н.п.	2B1в.п.	2B2н.п.	2B2в.п.	2B3	2B4	
$\text{SiO}_2$	0,50	2,82	3,51	3,88	3,84	3,47	2,42	4,04	3,1
$\text{TiO}_2$	0,012	0,049	0,065	0,065	0,054	0,056	0,059	0,078	0,054
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,38	1,65	1,47	2,20	2,12	2,47	1,39	1,94	1,70
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,83	0,34	0,15	0,19	0,27	0,22	0,12	0,18	0,32
$\text{MnO}$	0,0096	0,0051	0,0009	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,0032
$\text{MgO}$	0,068	0,076	0,063	0,063	0,087	0,067	0,068	0,086	0,076
$\text{CaO}$	0,099	0,21	0,091	0,14	0,11	0,11	0,085	0,12	0,13
$\text{Na}_2\text{O}$	0,12	0,13	0,12	0,11	0,17	0,10	0,10	0,13	0,13
$\text{K}_2\text{O}$	0,009	0,060	0,056	0,068	0,11	0,079	0,044	0,088	0,070
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,0028	0,007	0,0047	0,035	0,015	0,031	0,010	0,10	0,031
ППП/LOI	97,97	93,53	93,8	92,8	93,2	93,39	95,70	93,25	94,5
Сумма/Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$A^d$ , %	2,2	5,9	6,3	7,2	7,2	7,2	4,8	7,3	6,1
$V^{dat}$ , %	44,9	44,8	47,6	47,6	45,2	45,2	44,7	44,3	45,5
Мощность, м/Thickness, m	1,80	2,70	0,98	1,08	2,45	0,90	0,45	2,80	13,16

Примечание: ППП – потери при прокаливании.

Note: LOI – losses of ignition.

Исследован большой спектр элементов-примесей в углях, золах углей и вмещающих породах. Изученный спектр включает все основные токсичные и ценные элементы-примеси, в том числе группу редких и благородных металлов. Среднее содержание элементов-примесей (табл. 2) для разреза в целом ниже кларковых значений, определенных М.П. Кетрис и Я.Э. Юдовичем для каменных углей мира [26–28]. Исключением является кобальт, повышенные содержания которого отмечены по всему разрезу, особенно в пластах 2B1 и 2B3. Надкларковыми значениями также характеризуются Cs и Ba.

Распределение элементов-примесей в разрезе по пластам неравномерно. Пласты 2B1 и 2B3 обогащены на фоне других пластов большой группой элементов

В пласте 2B1 установлено превышение по сравнению с угольным кларком содержаний Be, Sc, V, Co, Ni, Zn, Y, Zr, Mo, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba и Hg. При этом зольность у него невелика ( $A^d$  – 6,3 %), что обуславливает аномально высокие концентрации многих элементов в золе угля. Пласт 2B3 характеризуется аномальным составом и низкой зольностью ( $A^d$  – 4,8 %). Он отличается наибольшими содержаниями в разрезе Be, Sc, Co, Zr, Mo, W, Ag, Sb и U при повы-

шенных по сравнению с кларком для угля содержаниями V, Cs и Hg.

Повышенное по сравнению с кларком содержание Co и Ni также отмечено в пластах 1B22 и 2B1. Пласт 2B2 имеет повышенные содержания Zr, Ag и Cs, а пласт 2B4 – Sr, Ba, Zr и Cs. При этом пласт 2B4 имеет более высокую зольность, чем залегающие ниже пласты.

Пласт 1B21 отличается пониженным содержанием большинства элементов, что обусловлено его аномально низкой зольностью ( $A^d$  – 2,2 %). Он обогащен железом и марганцем, что может быть связано со специфической Fe–Mn металлогенной региона, где распространено Fe–Mn гидротермально-осадочное оруденение Атасуйского типа.

Исследования золы углей показали, что отдельные угольные пласты аномально обогащены Mo (до 130 г/т), Sc (до 135 г/т), Ag (до 5,4 г/т) и Be (до 79 г/т). Пласты 2B3 и 2B1 аномально обогащены группой элементов. В пласте 2B3 в золе угля установлены выше минимально промышленных значений содержания Be (79,4 г/т), Sc (135 г/т), V (771 г/т), Co (493 г/т), Y (201 г/т), Zr (3330 г/т), Mo (130 г/т), Ag (5,4 г/т), Hf (63,5 г/т), суммы P3Э+Y (679 г/т).

Таблица 2. Среднее содержание элементов-примесей в пластах угля, г/т

Table 2. Average impurity element content of coal seams, ppm

Элементы Elements	Пласты угля/Coal seams								Среднее Average	Кларк для угля* Clark for coal*
	1B21	1B22	2B1н.п	2B1в.п.	2B2н.п	2B2в.п.	2B3	2B4		
Li	1,1	3,79	6,1	6,6	3,4	4,8	2,5	3,3	3,7	14±1
Be	0,36	1,14	<b>2,9</b>	1,2	0,57	1,72	3,5	0,73	1,1	2,0±0,1
Sc	0,56	3,40	<b>6,0</b>	4,1	1,8	3,8	<b>7,8</b>	2,9	3,0	3,7±0,2
V	1,35	12,8	<b>30,9</b>	20,6	7,5	17,2	<b>30,5</b>	11,0	12,8	28±1
Cr	2,5	6,7	13,9	8,1	5,0	7,4	7,6	6,1	6,4	17±1
Co	4,8	<b>14,0</b>	<b>31,7</b>	<b>10,9</b>	4,1	5,4	<b>20,2</b>	5,2	<b>9,7</b>	6,0±0,2
Ni	10,1	<b>19,8</b>	<b>19,6</b>	10,9	9,3	7,0	13,2	6,0	11,7	17±1
Cu	10,1	9,0	13,5	13,6	8,3	8,7	9,0	7,2	9,3	16±1
Zn	3,7	11,1	<b>69,6</b>	8,3	6,4	10,6	23,3	16,2	14,8	28±2
Ga	0,40	2,9	4,8	5,0	2,6	3,9	4,8	3,3	3,0	6,0±0,2
Ge	0,09	1,50	1,6	0,91	0,26	0,9	<b>5,4</b>	0,69	0,95	2,4±0,2
As	1,1	1,9	5,7	3,2	2,7	4,0	4,8	2,3	2,7	9,0±0,7
Se	0,15	0,39	0,76	0,59	0,32	0,46	0,5	0,28	0,37	1,6±0,1
Br	3,2	4,1	3,7	3,0	5,6	3,1	3,4	3,9	4,0	6,0±0,8
Rb	0,30	5,0	13,2	10,5	10,2	6,6	5,0	7,1	6,9	18±1
Sr	7,3	20,5	19,5	<b>108</b>	37,0	75,7	14,6	<b>164</b>	63,0	100±7
Y	2,6	5,6	<b>13,7</b>	<b>8,4</b>	4,2	6,9	<b>8,6</b>	5,4	5,9	8,2±0,5
Zr	3,7	27,1	<b>56,4</b>	<b>37,7</b>	22,9	<b>69,7</b>	<b>165</b>	<b>36,4</b>	35,8	36±3
Nb	0,20	0,84	1,4	1,6	0,83	1,3	1,7	1,1	0,98	4,0±0,4
Mo	0,81	1,70	<b>3,3</b>	1,3	0,56	1,9	<b>7,2</b>	1,3	1,6	2,1±0,1
Ag	0,027	0,086	<b>0,16</b>	<b>0,12</b>	0,054	<b>0,15</b>	<b>0,26</b>	0,09	0,092	0,10±0,02
Cd	0,034	0,077	<b>0,24</b>	0,082	0,047	0,09	0,14	0,05	0,076	0,2±0,04
Sn	0,07	0,27	0,44	0,50	0,32	0,45	0,42	0,42	0,33	1,4±0,1
Sb	0,06	0,88	<b>1,4</b>	0,62	0,23	<b>1,4</b>	<b>3,3</b>	0,53	0,71	1,0±0,09
Cs	0,031	0,67	<b>4,0</b>	<b>1,4</b>	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>1,5</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>	1,1±0,12
Ba	39,9	137	<b>352</b>	<b>240</b>	87,4	133	83,2	<b>319</b>	<b>176</b>	150±20
La	2,0	5,5	9,2	<b>11,2</b>	6,7	7,4	3,6	7,2	6,4	11±1
Ce	3,6	12,1	19,4	<b>23,6</b>	13,4	16,9	8,4	14,8	13,4	23±1
Sm	0,29	0,95	1,78	1,59	0,83	1,3	0,95	0,89	0,97	2,2±0,1
Eu	0,06	0,21	0,41	0,31	0,14	0,26	0,24	0,17	0,20	0,43±0,02
Gd	0,31	0,90	1,98	2,0	0,76	1,3	1,26	0,85	0,95	2,7±0,2
Tb	0,045	0,16	<b>0,35</b>	0,26	0,11	0,20	0,20	0,15	0,16	0,31±0,02
Yb	0,12	0,38	<b>1,02</b>	0,61	0,33	0,50	0,65	0,43	0,43	1,0±0,07
Lu	0,12	0,053	0,17	0,088	0,04	0,068	0,10	0,057	0,075	0,20±0,01
Hf	0,07	0,49	1,1	0,93	0,52	<b>1,30</b>	<b>2,8</b>	0,79	0,72	1,2±0,1
Ta	0,012	0,050	0,094	0,085	0,054	0,062	0,088	0,079	0,060	0,3±0,02
W	0,11	0,39	0,56	0,42	0,20	0,63	<b>1,1</b>	0,42	0,38	0,99±0,11
Re**	0,7	1,1	0,79	0,76	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,88	
Tl	0,30	<b>0,73</b>	0,44	0,31	0,45	0,50	0,18	0,25	0,43	0,58±0,04
Au**	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	0,0044
Hg	88,2	64,7	59,2	<b>286</b>	<b>104</b>	39,3	<b>156</b>	39,1	88,9	100±10
Pb	1,3	4,5	7,4	5,8	2,8	5,7	4,5	3,4	3,9	9,0±0,7
Th	0,31	2,3	<b>3,6</b>	<b>4,6</b>	2,1	3,0	2,4	2,4	2,4	3,2±0,1
U	0,19	1,4	<b>2,2</b>	1,5	0,67	1,4	<b>2,4</b>	0,92	1,1	1,9±0,1
A <sup>d</sup> ,%	2,2	5,9	6,3	7,2	7,2	7,2	4,8	7,3	6,1	–

Примечание: \* – по [28] жирным шрифтом выделены значения, превышающие кларки для угля; \*\* – в мг/т.

Note: \* – according to [28] values in bold are above the clarks for coal; \*\* – in ppb.

#### Формы нахождения РЗЭ

Формы нахождения элементов – важный показатель условий образования угля, природы формирования в нем геохимических аномалий, а также это важный показатель, который определяет технологию извлечения ценных элементов-примесей из углей. В последнее время возрос интерес к РЗЭ, поэтому определение форм их нахождения особенно важно. Повышенное содержание РЗЭ и других сопутствующих элементов в углях месторождения Шубарколь предполагает наличие фаз-концентраторов данных элементов. Это может быть как минеральное, так и органическое вещество.

В процессе исследования элементов-примесей в углях выполнено изучение минеральных фаз и груп-

пового состава угля с целью ориентировочной оценки доли органического вещества в концентрировании элементов-примесей. Методом нейтронно-активационного анализа изучен состав элементов-примесей в каждой выделенной фракции, а также в промежуточных продуктах, и выполнен расчет баланса вещества по каждому элементу.

Анализ элементного состава угольных фракций показал, что РЗЭ концентрируются в большинстве случаев в остаточном угле, что говорит о возможной их связи с неорганическим веществом (табл. 3). Однозначный вывод сделать нельзя, так как не менее 20 % лантаноидов содержится в органическом веществе во фракции гуминовых кислот. Несмотря на крайне низкий выход этих кислот, в них сконцентрировано от 20

до 55 % РЗЭ. Возможно наличие других органических соединений РЗЭ в составе фракции остаточного угля. В целом можно признать, что La, Ce, Eu, Sm, Tb частично связаны с фракцией остаточных гуминовых кислот, не типичных для зрелых каменных углей. Распределение РЗЭ по фракциям группового состава представлено в табл. 3.

**Таблица 3.** Распределение РЗЭ по фракциям группового состава (пласт 2В4)

**Table 3.** REE distribution by group composition fractions (coal seam 2B4)

Фракции группового состава Coal phases	Выход фракций, % Phase yield, %	Содержание элементов, г/т Elements content, ppm						
		La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
Исходный уголь Initial coal	100	5,6	11,9	0,77	0,22	0,23	0,78	0,11
Битум/Bitumen	0,3	0,06	0,12	0,01	0,0	0,0	0,01	0,0
Общие ГК Common humic acids	2,6	82,7	154	12,1	3,6	4,9	7,2	0,85
Остаточный уголь Residual coal	97,1	3,5	8,1	0,46	0,12	0,11	0,61	0,09
		Выход фракций/Phase yield, %						
Исходный уголь Initial coal	100,0	100	100	100	100	100	100	100
Битум/Bitumen	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Общие ГК Common humic acids	2,6	38,6	33,5	41,0	42,3	55,2	23,8	20,4
Остаточный уголь Residual coal	97,1	61,1	66,2	58,6	57,4	44,7	75,9	79,0

В углях с разным, в том числе нижекларковым, содержанием РЗЭ значительная доля элементов приходится на гуминовые вещества, что доказывает важную роль органического вещества в накоплении лантаноидов в угле независимо от их валового содержания в пробе. С органическим веществом в форме гуматов связано 38,9 % лантана и 33,8 % церия. Доля тербия в связи с гуматами еще выше – 55,5 %. Другие органические комплексы в составе остаточного угля не исследовались. Наличие органо-минеральных комплексов РЗЭ в углях свидетельствует о накоплении их из водных растворов. Источником РЗЭ могут служить насыщенные обломками риолитов углевещающие породы или гранитоиды обрамления.

Роль минерального вещества в концентрировании РЗЭ можно оценить по данным электронно-микроскопических исследований. Исходя из литературных данных, самой распространенной минеральной формой нахождения лантаноидов в углях считаются фосфаты редких земель [29–31].

Проведены исследования минеральных фаз на электронном микроскопе в 11 пробах угля и 1 пробе золы угля. В силу низкой зольности углей месторождения Шубарколь ( $A^d \sim 6,1$  %) кластогенные микроминеральные частицы встречаются довольно редко и размеры их, как правило, малы (в среднем менее 3 мкм). Наиболее часто встречаются силикаты и

алюмосиликаты (кварц, каолинит, монтмориллонит, реликты полевых шпатов, мусковит-иллит). Форма выделения каолинита зависит от минерала, который он замещает. Попадаются агрегаты, состоящие из игольчатых, шестоватых кристаллов. Реликты полевых шпатов могут быть как хорошо сохранившимися, так и сильно корродированными. На отдельных участках они замещены каолинитом. Кристаллы достигают 45 мкм в длину. Иллит в чистом виде не встречается, но попадают чешуйки мусковита, в разной степени замещенные иллитом. Степень замещения отражается в облике кристаллов – от гладких чешуек до рыхлых (землистых).

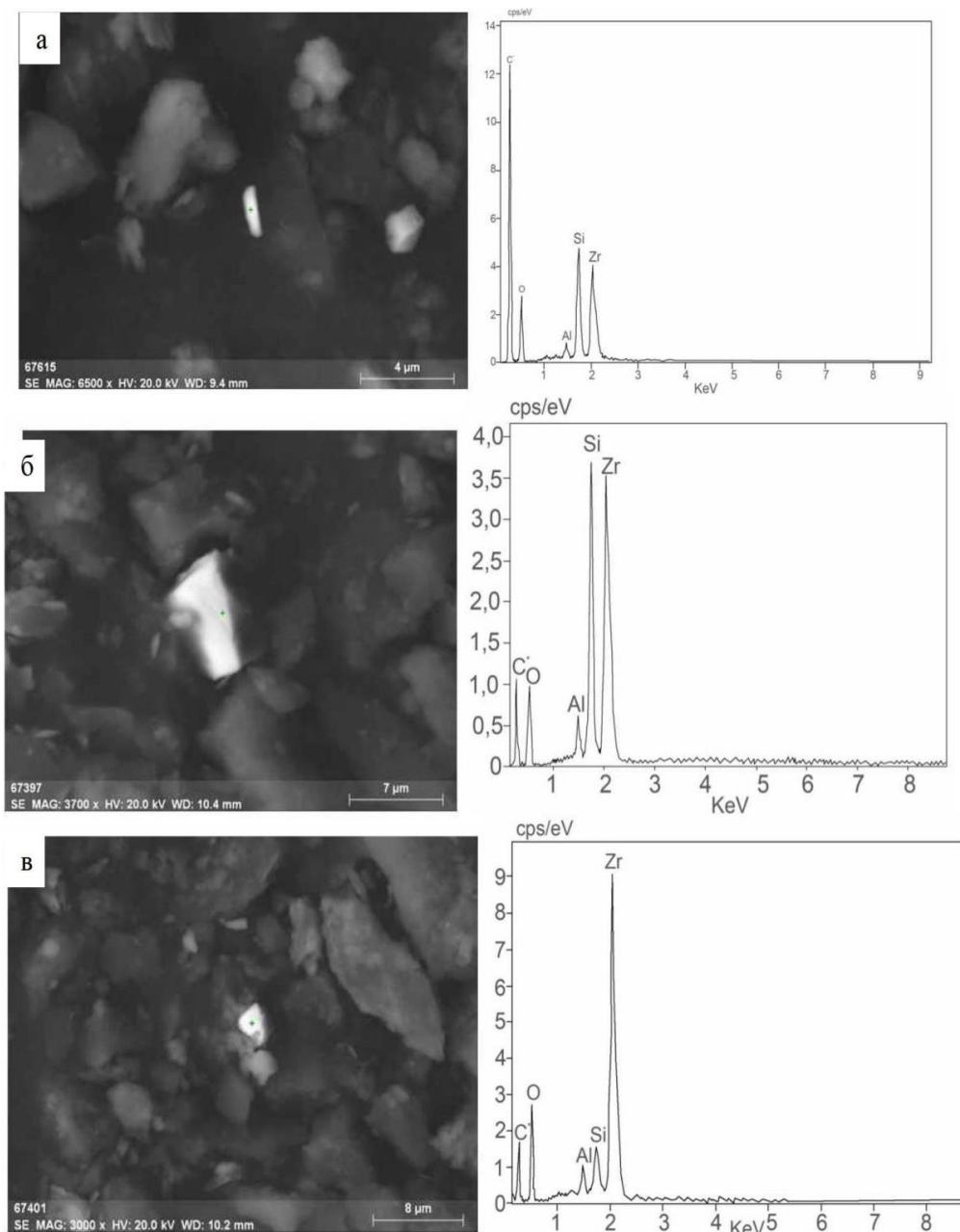
В угле встречаются цирконы в виде длиннопризматических кристаллов и их осколков (рис. 3, а, б). Из 11 изученных проб обнаружено единственное зерно бадделита со следами окатанности (рис. 3, в). В зерне (4 мкм), имеющем форму ракушки, выявлена примесь иттрия. Обращает на себя внимание единичная находка горсейкита в виде натечного образования на частице угля (рис. 4, а). К редким находкам относится турмалин (эльбаит), выявленный только в золе угля, где он встречается довольно часто.

Барит выявлен не во всех 11 пробах, но там, где он есть, встречается довольно часто. Он может иметь различную форму. Встречаются призматические, уплощенные кристаллы, игольчатые, пластинчатые и таблитчатые. Примесь стронция в барите достигает 6 %. Корреляции между содержанием стронция и формой кристаллов нет, в пластинчатых кристаллах содержание стронция может быть как ниже предела обнаружения, так и на уровне 3–4 %.

Наибольший интерес представляют образцы с содержанием РЗЭ. При исследовании образца Ш-39-19 (пласт 2В1) в одной из минеральных фаз можно выделить длиннопризматический (столбчатый) кристалл фосфата РЗЭ. Длина кристалла ~7 мкм (рис. 5, а).

При исследовании угольной пыли (проба Ш-99-19, пласт 2В3) были обнаружены следующие микроминералы: каолинит, пирит, сульфат железа, циркон, фосфат РЗЭ, рутил, кварц. Также выявлен алюмофосфат бария, по составу точно соответствующий горсейкиту (рис. 4, а). Форма выделения минерала неправильная. Размер ~20 мкм в длину. Наблюдаются следы коррозии. Рутил в угольной пыли встречается в виде сильно корродированных зерен (рис. 4, б). Размер зерен не превышает 6 мкм в длину. Обнаружен призматический кристалл циркона размером 1,5 мкм в длину (рис. 3, а). В данной пробе довольно часто, по сравнению с другими пробами, встречаются фосфаты редких земель. Фосфаты представлены хорошо ограниченными призматическими кристаллами и их обломками (рис. 5, б). Минимальный размер зерен не превышает 1 мкм в длину, максимальный ~5 мкм в длину. По составу минерал соответствует монациту. Монацит – единственный обнаруженный редкоземельный минерал. Форма кристаллов призматическая. Следов окатанности на большинстве обнаруженных кристаллов нет.



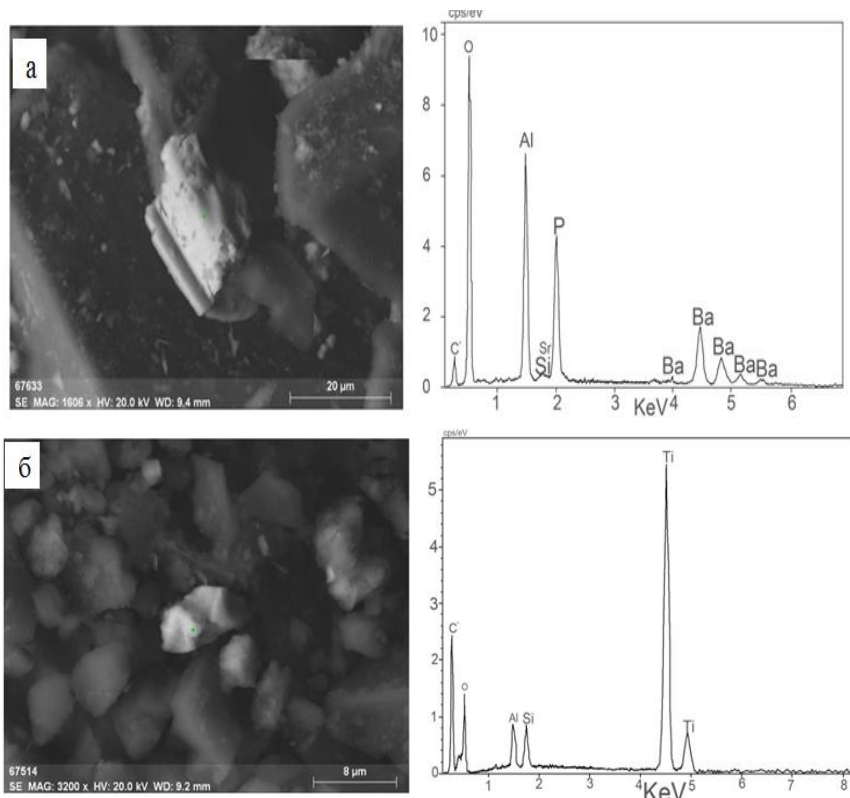


**Рис. 3.** Цирконы (а, б) и бадделейит (в) и их энергодисперсионный спектр  
**Fig. 3.** Zircons (a, б) and baddeleyite (в) and their energy dispersion spectra

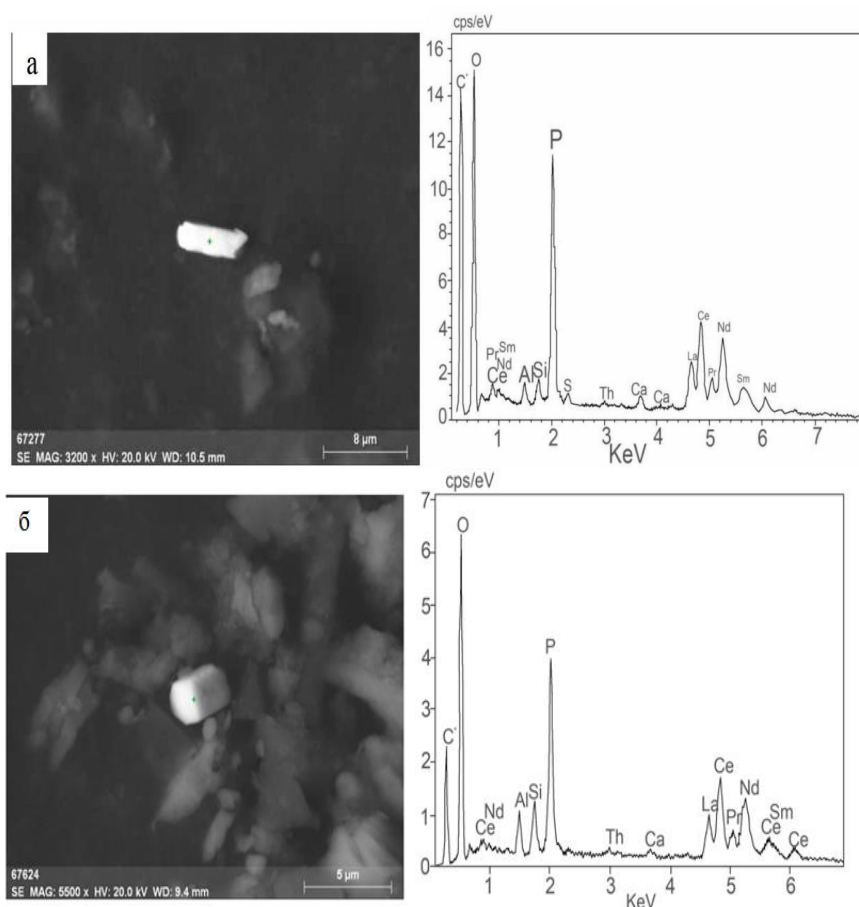
В золе угля обнаружены следующие минералы: каолинит, оксиды железа, ангидрит, натровый алюмосиликат, монацит, циркон, оксиды олова, бесформенная частица оксида олова. Морфологически агрегат напоминает пленки, образующиеся при озолении, но может быть и сильно корродированным агрегатом касситерита (рис. 6, а). В составе частицы выявлена примесь свинца (2 %). В алюмосиликатных пленках выявлено зерно циркона. Форма для него не характерная, огранки не наблюдается. В составе циркона присутствует иттрий ~3 %. Размер частицы ~6 мкм в длину (рис. 6, б). Встречаются и более типичные для циркона формы, длиннопризматические. Размер частиц не превышает 2 мкм в длину.

Таким образом, электронно-микроскопические исследования показали, что в углях распространены

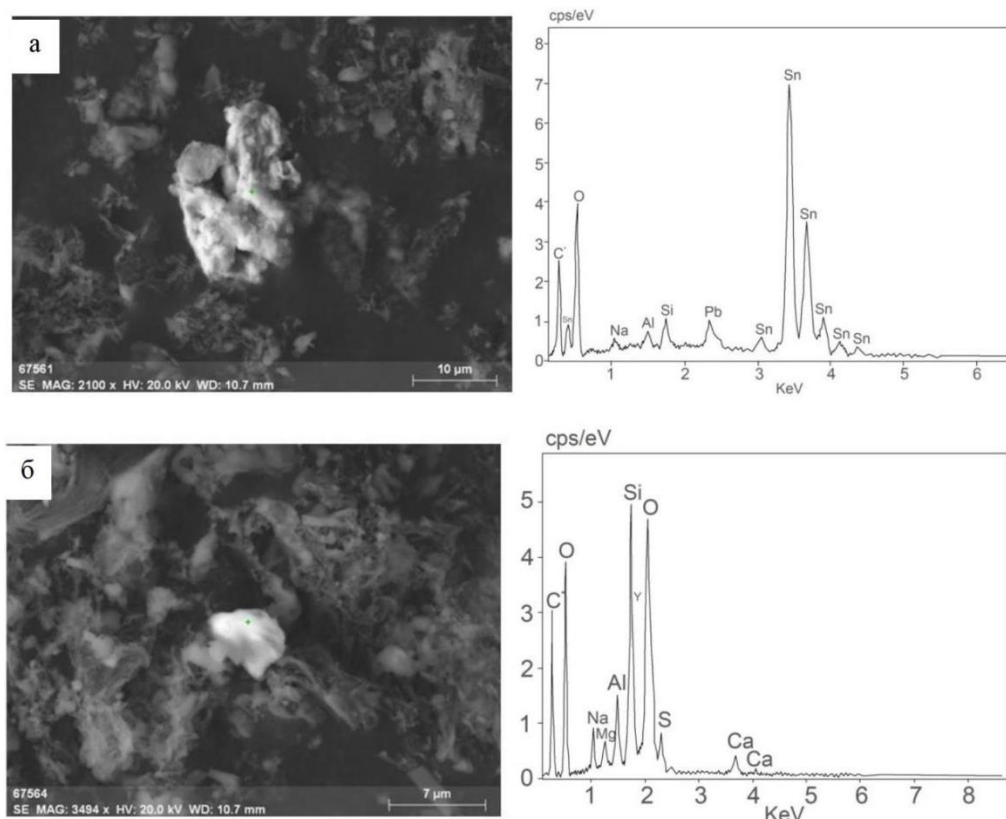
лишь весьма тонкие минеральные фазы ценных элементов-примесей, не превышающие 100 мкм. Это означает, что получение промышленных концентратов РЗЭ (лантаноидов, иттрия и скандия) непосредственно из угля невозможно. Крайне мелкие выделения этих минералов требуют дробления и истирания угля до 10 мкм. Малая доля минеральных фаз ценных элементов-примесей в углях, большие затраты на измельчение угля и отсутствие рентабельной технологии извлечения минеральных фаз из угольной пыли ограничивают возможность извлечения ценных элементов непосредственно из угля. Учитывая низкую легучесть исследованных ценных элементов-примесей при сжигании угля, наиболее рациональна в данном случае переработка золошлаков.



**Рис. 4.** Горсейксит (а) и рутил (б) в угле и их энергодисперсионный спектр  
**Fig. 4.** Gorceixite (a) and rutile (б) in coal and their energy dispersion spectra



**Рис. 5.** Редкоземельные фосфаты (монацит) в угле и их энергодисперсионные спектры  
**Fig. 5.** Rare earth phosphates (monazite) in coal and their energy dispersion spectra



**Рис. 6.** Оксид олова (а) и циркон (б) в золе угля и их энергодисперсионные спектры  
**Fig. 6.** Tin oxide (a) and zircon (b) in coal ash and their energy dispersive spectra

#### Условия накопления элементов-примесей в угле

Накопление элементов-примесей в угленосных отложениях месторождения Шубарколь обусловлено преимущественно гипергенными процессами, которые определили накопление их в исходном веществе угля (в торфе) и в дальнейшем, при диагенезе и катагенезе, их перераспределение [9]. Образование месторождений уран-угольного типа и формирование в них высоких концентраций урана связано с процессами гипергенного окисления угля [32]. Гипергенное окисление углей может сопровождаться накоплением не только урана, но и других редких элементов-примесей, в том числе Mo, Re, РЗЭ. Согласно работе [18] изучение форм нахождения Sc в торфах и бурых углях из различных месторождений показало, что большое его количество содержится в органическом веществе. Основным поставщиком Zr в уголь считается терригенный и вулканогенный материал [26]. Фактором накопления Zr и Hf в углях может быть размыв кислых и щелочных пород в источниках сноса, пирокластика и разгрузка в угольные пласты (торфяник) углекислых вод с повышенным их содержанием [23].

Главные элементы, образующие сульфидные минералы, – Fe, Zn, Cu, Mg, Ag, Hg, Pb, Bi, Co, Mn, V, Ga, Ge, As, S. Эти минералы имеют в основном эпигенетическое происхождение. Наиболее распространены пирит (FeS<sub>2</sub>), халькопирит (CuFeS<sub>2</sub>) и сфалерит (ZnS). Одним из главных механизмов образования сульфидов железа, в том числе пирита, в углях место-

рождения Шубарколь является взаимодействие поверхностных водных растворов, содержащих железо, с сероводородом, выделяющимся в результате сульфат-редукции и разложения органических остатков угольной массы. В зоне окисления формируются сидерит, лимонит и др., а в условиях восстановительной среды с сероводородом – сульфиды.

В накоплении аномальных концентраций элементов-примесей определяющую роль играет состав пород области сноса (рис. 1). Возможным источником сноса материала, обогащенного редкими элементами литофильной группы, могли быть гранитоиды среднедевонских интрузий и вулканогенные породы риолитового состава, а также коры выветривания по ним. Источником элементов-сидерофилов и халькофилов служили базальтоиды и интрузивные тела габбро-диабазовой формации. Так, скандий образует аномалии в пластах 2В1 и 2В3 совместно с ванадием и некоторыми элементами-халькофилами. Анализ геологического положения скандиеносных углей указывает на их связь с обогащенными скандием породами базитового ряда. Содержание Sc в пласте 2В3 7,8 г/т в угле и 135,0 г/т в золе угля при зольности пласта 4,8 %. Распределение скандия в угольном пласте неравномерно. В вертикальном профиле пласта обогащены Sc прикровельная и припочвенная зоны, что указывает на гидрогенный механизм поступления его в угольный пласт и перераспределение в пределах пласта. Содержание скандия в углевещающих толщах в 1,5 раза превышает кларк для осадочных пород. Все это указывает на гидрогенный механизм его накопления [33].

Накопление в углях Со также связано с породами базитового ряда. Зола угля обогащена им выше кларка в золе каменных углей. Особое внимание обращают на себя пласты 2В1 и 2В3, содержание кобальта в которых превышает кларк в 14 и 13 раз соответственно. Эти концентрации соответствуют промышленным значениям. Подсчитанные ресурсы кобальта в исследованном блоке соответствуют среднему по запасам месторождению.

Геохимическая специализация углей на Ва и Zn, а возможно, Sb и Ge, согласуется с наличием вблизи месторождения Шубарколь гидротермального Ва-Pb-Zn месторождения Атасу [14].

Месторождение Шубарколь образовалось в результате преобразования торфов озерного бассейна в угли, что говорит о фациальном факторе накопления металлов. Согласно Е.М. Маркович и др. [34], торфонакопление в Центральном Казахстане в юрский период происходило в условиях застойных и проточных вод. При торфонакоплении РЗЭ в основном концентрируются в составе водорастворимых и легкогидролизуемых веществ и в подчиненном количестве в гуминовых кислотах. Минеральное вещество не играет существенной роли в накоплении лантаноидов в торфе, хотя и присутствует в форме устойчивых РЗЭ минералов (монацит, ксенотим, циркон). Тяжелые лантаноиды имеют тенденцию к накоплению в более высокомолекулярных гумусовых кислотах. Осадочные и интрузивно-вулканогенные породы, которые окружают месторождение, служат поставщиком обломочного материала во время образования угленосных пластов.

Формы нахождения РЗЭ частично связаны с органическим веществом (табл. 3), часть имеет кластогенную природу. Одной из основных минеральных фаз РЗЭ являются цирконы, источником которых служат кислые и щелочные породы в обрамлении угленосной впадины (рис. 1). Распространен фосфат редких земель монацит. Монацит также попал в угольный пласт в составе кластогенного материала. Находка турмалина в золе угля свидетельствует о наличии в юго-восточном и юго-западном обрамлении угленосной впадины гидротермально измененных пород преимущественно кислого состава (апогранитные грейзены, лейкограниты).

Проведенные исследования показали, что накопление основной массы редких элементов-примесей в углях происходило в основном в форме органических комплексов, формирование которых свидетельствует о преимущественно гидрогенном механизме концентрирования элементов в углях. Детальное изучение 12 проб угля и золы угля позволило выявить как распространенные для углей кластогенные минералы (циркон, монацит, бадделеит и др.), так и необычные, типа горсейксита. К редким находкам относится турмалин (эльбаит), выявленный в золе угля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Elemental and mineralogical anomalies in the coal-hosted Ge ore deposit of Lincang, Yunnan, southwestern China: Key role of N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-mixed hydrothermal solutions / Sh. Dai, P. Wang, C.R. Ward, Y. Tang, X. Song, J. Jiang, J.C. Hower, T. Li, V.V. Seredin,

#### Заключение

Благоприятные для торфонакопления геодинамические условия, существовавшие на территории Центрального Казахстана в юрский период, привели к формированию угольных пластов Шубаркольского месторождения пригодных для отработки открытым способом. Низкая зольность, теплотехнические характеристики и специфический состав элементов-примесей углей обуславливают высокий спрос на углепродукцию.

Проведенные исследования показали, что угли изученных угольных пластов участка Центральный-2 Шубаркольского месторождения (1В21, 1В22, 2В1, 2В2, 2В3 и 2В4) отличаются значительными вариациями содержаний основной массы изученных элементов-примесей. Среднее содержание элементов-примесей для разреза в целом ниже кларковых значений. Исключением является кобальт, повышенные содержания которого отмечены по всему разрезу, особенно контрастно в пластах 2В1 и 2В3. Надкларковыми содержаниями характеризуются также цезий и барий. При невысоком среднем содержании для участка отдельные пласты угля аномально обогащены большой группой редких элементов-примесей: Sc, V, Co, Y, Zr, Hf, Mo, Ag, отдельными лантаноидами и др.

Исследование золы углей показало, что угли участка Центральный-2 Шубаркольского месторождения могут рассматриваться не только как топливо, но и как ценное сырье для комплексной переработки. В пласте 2В3 в золе угля установлено содержание группы металлов: Be (79,4 г/т), Sc (135 г/т), V (771 г/т), Co (493 г/т), Y (201 г/т), Zr (3328 г/т), Mo (130 г/т), Ag (5,4 г/т), Hf (63,5 г/т), сумма РЗЭ+Y (679 г/т) выше минимально промышленных значений. Ресурсы большинства металлов в пределах участка, оцененные в соответствии с Инструкцией [35] по категории Р1, соответствуют мелким месторождениям. Ресурсы кобальта позволяют рассматривать угли участка Центральный-2 как среднее по запасам месторождение Со.

На раннем этапе углеобразования (торфонакопление) преобладают подвижные формы нахождения РЗЭ, среди которых значительна доля органических соединений. В природных условиях при формировании углей основная масса лантаноидов фиксируется в гуминовых кислотах. Среди минеральных форм РЗЭ в углях преобладают фосфаты, единственный обнаруженный редкоземельный минерал – монацит. Формы нахождения РЗЭ в углях свидетельствуют о том, что их концентрирование обусловлено ведущей ролью гидрогенного механизма. Независимо от источника поступления в бассейн угленакопления, лантаноиды в условиях агрессивной среды палеоторфяника в основной массе переходят в подвижную форму и в конечном итоге накапливаются в органическом веществе.

- N.J. Wagner, Y. Jiang, X. Wang, J. Liu // International Journal of Coal Geology. – 2015. – V. 152. – P. 19–46. DOI: org/10.1016/j.coal.2014.11.006
2. Dai Sh., Finkelman R.B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects // International Journal of Coal Geology. – 2018. – V. 186. – P. 155–164. DOI: org/10.1016/j.coal.2017.06.005

3. Folgueras M.B., Alonso M., Fernandez F.J. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements // *Fuel*. – 2017. – V. 192. – P. 128–139. DOI: [org/10.1016/j.fuel.2016.12.019](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.019)
4. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of north Asia (Siberia, Russian Far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan) / S.I. Arbutov, I.Y. Chekryzhov, R.B. Finkelman, Y.Z. Sun, C.L. Zhao, S.S. Il'enok, M.G. Blokhin, N.V. Zarubina // *International Journal of Coal Geology*. – 2019. – V. 206. – P. 106–120.
5. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East / S.I. Arbutov, I.Yu. Chekryzhov, D.A. Spears, S.S. Il'enok, B.R. Soktoev, N.Yu. Popov // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V. 139. – P. 1–18. DOI: [org/10.1016/j.oregeorev.2021.104537](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104537)
6. Редкие металлы в бурогольных месторождениях Приморья и их ресурсный потенциал / В.И. Вялов, А.И. Ларичев, Е.В. Кузнецова, А.Х. Богомолов, М.И. Гамов // *Региональная геология и металлогения*. – 2012. – № 51. – С. 96–105.
7. Seredin V., Finkelman R. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types // *International Journal of Coal Geology*. – 2008. – V. 76. – P. 253–289.
8. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. – Ростов на Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2002. – 296 с.
9. Амангелдыкызы А. Исследование распространенности редкоземельных металлов в углях главных угольных бассейнов Центрального Казахстана: PhD дис., 6D070600. – Караганда, 2021. – 202 с.
10. Микрокомпонентный состав углей Центрального Казахстана / А.А. Сафонов, В.И. Парафилов, А.Д. Маусымбаева, Л.М. Ганеева, В.С. Портнов // *Уголь*. – 2018. – С. 70–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-9-70-75>
11. Кажумуханова М.З. Токсичные элементы-примеси в углях Республики Казахстан // *Экогеохимия органического топлива и экологические проблемы территорий*. – Томск: Томский политехнический университет, 2015. – С. 361–364.
12. Шпирт М.Я. Формы соединений микроэлементов и их превращения при переработке твердых горючих ископаемых // *Химия твердого топлива*. – 2004. – № 6. – С. 62–84.
13. Modes of occurrence of elements in coal: a critical evaluation / S. Dai, R.B. Finkelman, D. French, J.C. Hower, I.T. Graham, F. Zhao // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 222. – 103815. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103815> (дата обращения 07.11.2022).
14. Ибрагимова Д., Портнов В. Минеральные формы элементов-примесей в угле и золе углей месторождения Шубарколь (Центральный Казахстан) // *Scientific Collection «InterConf», (74): with the Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Scientific and Practical Conference «Recent Scientific Investigation»*. – Oslo, Norway, 2021. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/14547> (дата обращения 07.11.2022).
15. Геология меторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 1. Угольные бассейны и месторождения СССР / И.А. Кузнецов, В.В. Лагутина, М.Л. Левенштейн, В.С. Попов, А.З. Широков. – М: Недра, 1963. – 1210 с.
16. Тимофеев А.А., Череповский В.Ф. Угольная база России. Т. 1. Угольные бассейны и месторождения Европейской части России (Северный Кавказ, Восточный Донбасс, Подмосковный, Камский и Печорский бассейны, Урал). – М.: ЗАО Геоинформмарк, 2000. – 483 с.
17. Педаш Е.Т., Ко Н.А. Отчет о детальной разведке Шубаркольского угольного месторождения. Кн. 1. Текст отчета. – Караганда, 1987. – 320 с.
18. Маусымбаева А.Д. Изучение особенностей вещественного состава и направления комплексного использования углей месторождения Шубарколь (Центральный Казахстан): PhD дис., 6D070600. – Караганда, 2020. – 160 с.
19. Geochemical specialization of the Shubarkol deposit coals / V.I. Parafilov, A. Amangeldikyzy, V.S. Portnov, A.N. Kopobaeva, A.D. Maussymbaeva // *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – № 5. – P. 5–10. DOI: [10.33271/NVNGU/2020-5/005](https://doi.org/10.33271/NVNGU/2020-5/005).
20. Tectonic factors of impurity elements accumulation at the Shubarkol coal deposit (Kazakhstan) / A.N. Kopobaeva, V.S. Portnov, S.P. Kim, A. Amangeldikyzy, N.S. Askarova // *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2021. – № 5. – P. 11–15. DOI: [org/10.33271/nvngu/2021-5/011](https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-5/011)
21. Пашкова М.А., Пономарева М.В. Петрографическое исследование углей и вмещающих пород месторождения Шубарколь // *Труды университета*. – Караганда: Карагандинский государственный технический университет, 2015. – № 2 (59). – С. 73–76.
22. Аналитические подходы к количественному определению содержания химических элементов в углях и углистых породах с использованием методов ИСП-МС и ИНАА / Н.В. Зарубина, М.Г. Блохин, Д.С. Остапенко, И.Ю. Чекрызов, С.И. Арбузов, А.Ф. Судько // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 99–112.
23. Enrichment of Li-Ga-Zr-Hf and Se-Mo-Cr-V-As-Pb assemblages in the № 11 superhigh organic sulfur coal from the Song shuping coal mine weibe coalfield Shaanxi north / S. Li, P. Wu, G. Yang, X. Zhuang, X. Querol, Y. Zhangquan // *Energies*. – 2020. – V.13. – P. 1–19. DOI: [10.3390/en13246660](https://doi.org/10.3390/en13246660)
24. Ткачев Ю.А., Юдович Я.Э. Статистическая обработка геохимических данных. Методы и проблемы. – Л.: Наука, 1975. – 233 с.
25. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Неорганическое вещество углей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 422 с.
26. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
27. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 656 с.
28. Ketrís M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals // *International Journal of Coal Geology*. – 2009. – V. 78. – P. 135–148.
29. Finkelman R.B. Modes of occurrence of trace elements in coal // *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.* – 1981. – № 81–99. – P. 322.
30. Birk D., White J.C. Rare earth elements in bituminous coals and underclays of the Sydney Basin, Nova Scotia: element sites, distribution, mineralogy // *International Journal of Coal Geology*. – 1991. – V. 19. – P. 219–251.
31. Qi H., Hu R., Zhang Q. REE geochemistry of the Cretaceous lignite from Wulantuga Germanium Deposit, Inner Mongolia, Northeastern China // *International Journal of Coal Geology*. – 2007. – V. 71. – P. 329–344.
32. Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. – М.: ЗАО Геоинформмарк, 2000. – 608 с.
33. Арбузов С.И. Природа аномальных концентраций скандия в углях // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 56–64.
34. Маркович Е.М., Просвирякова З.П., Фадеева И.З. Палеогеоботаническая зональность и климат среднего мезозоя // *Атлас карт угленакпления на территории СССР. Объяснительная записка*. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 251–260.
35. Инструкция по изучению и оценке попутных твердых полезных ископаемых и компонентов при разведке месторождений угля и горючих сланцев. – М.: Наука, 1987. – 136 с.

Поступила: 08.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 08.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Ибрагимова Д.А.**, докторант Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова.

**Арбузов С.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета; первый заместитель директора по научной работе Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

**Портнов В.С.**, доктор технических наук, профессор Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова.

UDC 553.94'493(574.3)

## METALLIFEROUS COALS OF SHUBARKOL DEPOSIT (CENTRAL KAZAKHSTAN)

Diana A. Ibragimova<sup>1</sup>,  
podgornaya1992@mail.ru

Sergey I. Arbuzov<sup>2,3</sup>,  
siarbuzov@mail.ru

Vasiliy S. Portnov<sup>1</sup>,  
vs\_portnov@mail.ru

<sup>1</sup> Abylkas Saginov Karaganda technical university,  
56, Nazarbaev avenue, Karaganda, 100056, Republic of Kazakhstan.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>3</sup> Far East Geological Institute FEB RAS,  
159, Prospekt 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the possibility of using coal not only as energy fuel, but also as a source of valuable elements-impurities (Ge, Re, Ga, Nb, Zr, Hf, Y, Au, REE, etc.). This is especially true of toxic impurities, since a significant amount of them are accumulated in ash and slag waste, and a number of elements are carried out with gas phase or ash-entrainment into the atmosphere, which affects environmental pollution.

**The main aim** of the research is to assess the content of elements-impurities and the forms of their presence in coals and ashes of the Shubarkol coal deposit.

**The objects** of the study are coals and carbon-bearing rocks of the Shubarkol deposit (Central Kazakhstan).

**Methods:** carbon spectrographic studies; IR spectrometric and pyrolytic; instrumental neutron activation analysis; mass spectrometric method with inductively coupled plasma; scanning electron microscopy with x-ray spectral analysis.

**Results.** The authors have revealed the enrichment of coals from the Shubarkol deposit with REE, Sc, Co, Cs, Zr, Ag and Ba. Coal seam 2B3 ( $A^d - 4,8\%$ ) is characterized by the highest contents in the section of Be, Sc, Co, Zr, Mo, W, Ag, Sb and U with increased contents of V, Cs and Hg in comparison with Clark for coal. Individual coal seams (2B3 and 2B1), abnormally enriched with a group of elements and their coal ash can be considered as a rare-metal complex mineralization. In coal ash of 2B3 seam the content of a group of metals: Be (79,4 g/t), Sc (135 g/t), V (771 g/t), Co (493 g/t), Y (201 g/t), Zr (3328 g/t), Mo (130 g/t), Ag (5,4 g/t), Hf (63,5 g/t), and the sum of REE+Y (679 g/t) is higher than the minimum industrial values. Mineral forms of rare earth elements (zircon, baddeleyite, and monazite) were identified.

**Key words:**

Shubarkol deposit, coal, coal ash, element-impurities, modes of occurrences, rare elements.

## REFERENCES

- Dai Sh., Wang P., Ward C.R., Tang Y., Song X., Jiang J., Hower J.C., Li T., Seredin V.V., Wagner N.J., Jiang Y., Wang X., Liu J. Elemental and mineralogical anomalies in the coal-hosted Ge ore deposit of Lincang, Yunnan, southwestern China: Key role of  $N_2$ - $CO_2$ -mixed hydrothermal solutions. *International Journal of Coal Geology*, 2015, vol. 152, pp. 19–46. DOI: [org/10.1016/j.coal.2014.11.006](https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.11.006)
- Dai Sh., Finkelman R.B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects. *International Journal of Coal Geology*, 2018, vol. 18, pp. 155–164. DOI: [org/10.1016/j.coal.2017.06.005](https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.06.005)
- Folgueras M.B., Alonso M., Fernandez F.J. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements. *Fuel*, 201, vol. 19, pp. 128–139. DOI: [org/10.1016/j.fuel.2016.12.019](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.019)
- Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Y., Finkelman R.B., Sun Y.Z., Zhao C.L., Il'enok S.S., Blokhin M.G., Zarubina N.V. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of north Asia (Siberia, Russian Far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan). *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 206, pp. 106–120.
- Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Spears D.A., Il'enok S.S., Soktoev B.R., Popov N.Yu. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coal-field, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 139, pp. 1–18. DOI: [org/10.1016/j.oregeorev.2021.104537](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104537).
- Vyalov V.I., Larichev A.I., Kuzevanova E.V., Bogomolov A.H., Gamov M.I. Redkie metally v burougolnykh mestorozhdeniyakh Primorya i ikh resursniy potentsial [Rare metals in lignite deposits of Primorye and their resource potential]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*, 2012, no. 51, pp. 96–105.
- Seredin V.V. Metallonosnost ugley: usloviya formirovaniya i perspektivy osvoeniya [Metal content of coals: formation conditions and development prospects]. *Ugolnaya baza Rossii* [Coal base of Russia]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2004. Vol. VI, pp. 453–519.
- Kizilshtein L.Ya. *Ekogeokhimiya elementov-primesey v uglyakh* [Eco-geochemistry of elements-impurities in coals]. Rostov on Don, SKNC VSH Publ. house, 2002. 296 p.
- Amangeldikyzy A. *Issledovanie rasprostranennosti redkozemelnykh metallov v uglyakh glavnykh ugolnykh basseinov Tsentralnogo Kazakhstana* [Study of rare earth metals occurrence in coals of the main coal basins of Central Kazakhstan]. Diss. PhD, 6D070600. Karaganda, 2021. 202 p.
- Safonov A.A., Parafilov V.I., Maussymbaeva A.D., Ganeeva L.M., Portnov V.S. Mikrokomponentniy sostav ugley Tsentralnogo Kazakhstana [Micro-component composition of coals in Central Kazakhstan]. *Coal*, 2018, pp. 70–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-9-70-75>
- Kazhumukhanova M.Z. Toksichnye elementy-primesi v uglyakh Respubliki Kazakhstan [Toxic elements-impurities in the coals of the Republic of Kazakhstan]. *Ecogeokhimiya organicheskogo topliva i ekologicheskie problemy territoriy* [Eco-geochemistry of fossil fuels and environmental problems in the area]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. pp. 361–364.
- Shpirt M.Ya. Forms of compounds of trace elements and their transformation during the processing of solid fossil fuels. *Solid Fuel Chemistry*, 2004, vol. 38, no. 6, pp. 51–72.

13. Dai S., Finkelman R.B., French D., Hower J.C., Graham I.T., Zhao F. Modes of occurrence of elements in coal: a critical evaluation. *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 222, 103815. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103815> (accessed 7 November 2022).
14. Ibragimova D.A., Portnov V.S. Mineralnye formy elementov-primesey v ugle i zole uglya mestorozhdeniya Shubarkol (Tsentralny Kazakhstan) [Mineral forms of elements-impurities in coal and ash from the Shubarkol deposit (Central Kazakhstan)]. *Scientific Collection «InterConf», (74): with the Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Scientific and Practical Conference «Recent Scientific Investigation»*. Oslo, Norway, 2021. Available at: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/14547> (accessed 7 November 2022).
15. Kuznetsov I.A., Lagutina V.V., Levenshtein M.L., Popov V.S., Shirokov A.Z. *Geologiya mestorozhdeniy uglya i goruchikh slantsev SSSR. T. 1. Ugolnye basseiny i mestorozhdeniya SSSR* [Geology of coal and oil shale deposits in the USSR. Vol. 1. Coal Basins and Deposits of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1963. 1210 p.
16. Timofeev A.A., Cherepovskiy V.F. *Ugolnaya baza Rossii (Severny Kavkaz, Vostochny Danbass, Podmoskovny, Kamsky i Pechorsky basseiny, Ural)* [Russia's Coal Base. Vol. 1. Coal basins and deposits in the European part of Russia (North Caucasus, Eastern Donbass, Moscow Region, Kamsky and Pechorsky basins, the Ural)]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2000. 483 p.
17. Pedash E.T., Ko N.A. *Ochet o detalnoy razvedke Shubarkolskogo ugolnogo mestorozhdeniya. Kn. 1* [Report on detailed exploration of the Shubarkol coal deposit]. Karaganda, 1987. B. 1, 320 p.
18. Maussymbaeva A.D. *Izucheniye osobennostey veshchestvennoy sostavy i napravleniya kompleksnogo ispolzovaniya ugley mestorozhdeniya Shubarkol (Tsentralny Kazakhstan)* [Study of the features of the material composition and directions of complex use of coals from the Shubarkol deposit (Central Kazakhstan)]. Diss. PhD, 6D070600. Karaganda, 2020. 160 p.
19. Parafilov V.I., Amangeldikyzy A., Portnov V.S., Kopobaeva A.N., Maussymbaeva A.D. Geochemical specialization of the Shubarkol deposit coals. *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, no. 5, pp. 5–10. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/005.
20. Kopobaeva A.N., Portnov V.S., Kim S.P., Amangeldikyzy A., Askarova N.S. Tectonic factors of impurity elements accumulation at the Shubarkol coal deposit (Kazakhstan). *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, no. 5, pp. 11–15. DOI: [org/10.33271/nvngu/2021-5/011](https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-5/011)
21. Pashkova M.A., Ponomareva M.A. Petrograficheskoe issledovanie ugley i vmeshchayushchikh porod mestorozhdeniya Shubarkol [Petrographic study of coals and host rocks of the Shubarkol deposit]. *Trudy universiteta* [University papers]. Karaganda, Karaganda state technical university Publ., 2015. No. 2 (59), pp. 73–76.
22. Zarubina N.V., Blokhin M.G., Ostapenko D.S., Chekryzhov I.Yu., Arbutov S.I., Sudyko A.F. Analytical approaches to the quantification of chemical elements in coals and coal-bearing rocks using ICP-MS and INAA methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 99–112. In Rus.
23. Li S., Wu P., Yang G., Zhuang X., Querol X., Zhangquan Y. Enrichment of Li-Ga-Zr-Hf and Se-Mo-Cr-V-As-Pb assemblages in the № 11 superhigh organic sulfur coal from the Song shuping coal mine weibe coalfield Shaanxi north. *Energies*, 2020, vol. 13, pp. 1–19. DOI: 10.3390/en13246660
24. Tkachev Yu.A., Yudovich Ya.E. *Statisticheskaya obrabotka geokhimicheskikh dannyykh. Metody i problemy* [Statistical processing of geochemical data. Methods and problems]. Leningrad, Nauka publ., 1975. 233 p.
25. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Neorganicheskoe veshchestvo ugley* [Inorganic matter of coals]. Ekaterenburg, URO RAN Publ., 2002. 422 p.
26. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Tsennye elementy-primesi v uglyakh* [Valuable trace elements in coal]. Ekaterenburg, URO RAN Publ., 2006. 538 p.
27. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Toksichnye elementy-primesi v iskopaemykh uglyakh* [Toxic elements-impurities in fossil coals]. Ekaterenburg, URO RAN Publ., 2005. 656 p.
28. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 78, pp. 135–148.
29. Finkelman R.B. Modes of occurrence of trace elements in coal. *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep*, 1981, no. 81–99, pp. 322.
30. Birk D., White J.C. Rare earth elements in bituminous coals and underclays of the Sydney Basin, Nova Scotia: element sites, distribution, mineralogy. *International Journal of Coal Geology*, 1991, vol. 19, pp. 219–251.
31. Qi H., Hu R., Zhang Q. REE geochemistry of the Cretaceous lignite from Wulantuga Germanium Deposit, Inner Mongolia, Northeastern China. *International Journal of Coal Geology*, 2007, vol. 71, pp. 329–344.
32. Kislyakov Ya.M., Shchetochkin V.N. *Gidrogennoe rudoobrazovanie* [Hydrogenic ore formation]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2000. 608 p.
33. Arbuzov S.I. The nature of anomalous scandium concentrations in coal. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 56–64. In Rus.
34. Markovich E.M., Prosviryakova Z.P., Fadeeva I.Z. *Paleogeobotanicheskaya zonalnost i klimat srednego mezozoya. Atlas kart uglenakopleniya na territorii SSSR. Obyasnitelnaya zapiska* [Paleogeobotanical zoning and climate in the Middle Mesozoic. Atlas of maps of coal mining in the territory of the USSR. Explanatory note]. Moscow, Leningrad, AN USSR Publ., 1962. pp. 251–260.
35. *Instruktsiya po izucheniyu i otsenke poputnykh tverdykh poleznykh iskopaemykh i komponentov pri razvedke mestorozhdeniy uglya i goruchikh slantsev* [Guidelines for the study and assessment of associated solid minerals and components in the exploration of coal and oil shale deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 136 p.

Received: 8 November 2022.

Reviewed: 8 December 2022.

#### Information about the authors

**Diana A. Ibragimova**, doctoral student, Abylkas Saginov Karaganda technical university.

**Sergey I. Arbuzov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; first deputy director for academic affairs, Far East Geological Institute FEB RAS.

**Vasilij S. Portnov**, Dr. Sc., professor, Abylkas Saginov Karaganda technical university.

УДК 624.131

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАНДАРТНЫХ И УСКОРЕННЫХ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Николенко Ирина Александровна<sup>1</sup>,  
qwnwhalle@bk.ru

Кулешов Александр Петрович<sup>1</sup>,  
87kuleshov@mail.ru

Строкова Людмила Александровна<sup>2</sup>,  
sla@tpu.ru

<sup>1</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,  
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** работы состоит в анализе результатов полевых контрольных испытаний грунтов статической нагрузкой на вдавливание натурными сваями, выполненными по ускоренной и стандартной методикам в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов. Сроки проведения испытаний грунтов сваями позволяют корректировать и ускорять темпы строительно-монтажных работ по устройству «нулевого цикла» фундаментов, сокращать время на принятие различных конструктивных решений и возведение технических систем, направленных на обеспечение механической безопасности проектируемых сооружений в части создания и поддержания требуемого температурно-прочностного режима грунтов оснований (термостабилизация грунтов) и дальнейшего его контроля в ходе строительства и эксплуатации зданий и сооружений (геотехнический мониторинг). В работе проанализированы два метода расчета, приведен анализ по рациональной области использования каждого метода.

**Цель:** вычисление и сопоставление расчетных нагрузок, полученных в ходе производства статических испытаний на вдавливание сваи в грунт, на основе требований регламентируемых и существующих методик измерений (стандартной и ускоренной) в условиях криолитозоны и оценка возможности применения того или иного способа расчета.

**Методы.** На первом этапе исследования рассмотрены вопросы организации и технологии производства полевых контрольных испытаний свай в северо-западной части Амурской области посредством оценки информации, отображенной в отчетственной нормативной документации: СП 25.13330.2020 и ГОСТ 5686-2020. Описаны инженерно-геокриологические условия территории проведения работ. На втором этапе выполнена оценка 11-ти полевых испытаний, проведены расчеты и сравнительный анализ несущей способности и расчетных нагрузок на сваи по результатам испытаний.

**Результаты.** Полученные данные рекомендуется использовать при строительстве зданий и сооружений на свайных фундаментах в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов для контроля и оперативного управления темпами возведения нулевого цикла фундаментов, для оценки экономической составляющей проекта и получения достоверных и необходимых данных о состоянии геологической среды.

### Ключевые слова:

несущая способность, рабочая испытываемая свая, сопоставимые испытания грунтов сваями, сравнительный анализ, полевые испытания, деформации, грунт многолетнемерзлый, температурный режим, расчетная нагрузка, основание, свайные фундаменты.

### Введение

Газовая отрасль занимает важное место в экономике нашей страны, в связи с чем на протяжении нескольких десятилетий идет масштабное обустройство многих месторождений и строительство инфраструктуры для транспортировки газа. Одним из стратегически приоритетных в настоящее время направлений является рынок Китая, для нужд которого реализуется проект «Сила Сибири» [1–12]. Этот газопровод – стратегически важная и крупнейшая система транспортировки газа на Востоке России, строительство которого идет ускоренными темпами ведущими строительными компаниями. В настоящее время заканчивается строительство второй ветки (2 этап) газопровода.

Строительные работы, как и любой производственный процесс, не проходит гладко, тем более, когда территория работ довольно отдалена от крупных городских агломераций, расположена в суровых кли-

матических условиях, имеет сложное геологическое, гидрогеологическое и тектоническое строение, а также не имеет нужной инфраструктуры (транспортной, производственной, бытовой и т. д.). Все перечисленные причины, а также человеческий фактор, который не является главным, приводят к отставанию от графика сдачи объекта в эксплуатацию, увеличению сроков строительства и экономическим издержкам.

На фоне всех возможных возникающих трудностей строители совместно с изыскателями и проектировщиками при любой возможности пытаются ускорить процесс обустройства территории – процесс строительно-монтажных и проектно-изыскательских работ.

Первая стадия строительства начинается с проведения изысканий и проектирования объекта, а заканчивается возведением фундамента зданий и сооружений с системами по обеспечению надежного его



функционирования. В основном в качестве фундаментов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов применяются металлические и железобетонные сваи разного диаметра и длины [13–19].

На начальном этапе строительства происходит погружение нескольких пробных свай для выполнения натуральных испытаний в соответствии с действующими нормами и правилами. Это выполняется с целью проверки геологического разреза, достоверности принятых параметров свай (длина, диаметр, материал) под фундамент и соответствия несущей способности расчетным проектным нагрузкам.

Положительные результаты испытаний дают возможность приступить к массовому погружению свайного поля, в противном случае необходимо будет корректировать проектные решения и проводить замену свай с одними параметрами на другие или увеличивать их число.

Производство работ по испытанию свай должно выполняться с соблюдением действующих «Правил техники безопасности» и требований, приведенных в соответствующих разделах ГОСТ 5686-2020, СП 25.13330.2020 [20, 21].

Контрольные статические испытания на вдавливание выполняются для определения расчетного сопротивления свай.

Суть испытаний состоит в увеличении нагрузок на натурные сваи, передаваемых в соответствии с заранее установленными ступенями – 1/10 от максимальной нагрузки, которая равна трехкратной величине проектной нагрузки, и измерении на каждой ступени перемещения (осадки).

Для испытаний свай на вдавливание в многолетнемерзлых грунтах рекомендуется применять установку в виде грузовой платформы или набора балок [22–26].

Работы по испытанию одиночных свай в составе фундаментов жилых, гражданских и промышленных сооружений вдавливающей нагрузкой на основании раздела 9 ГОСТ 5686-2020 производятся по двум методикам: динамометрическая (ускоренная) и стандартная.

Отличительной чертой этих двух методов является время их проведения в части проектно-исследовательских работ: для стандартных испытаний – 170 часов, для ускоренных – 34 часа.

Установка для проведения вдавливающих испытаний состоит из следующих основных элементов: упорная конструкция (платформа); гидравлический домкрат, устанавливаемый на голову сваи, покрытую наголовником; тарированный груз (металлические «чушки», железобетонные блоки и плиты, металлические балки, рельсы, мешки с песком, цементов); реперная система с аппаратурой для измерения перемещений испытываемой сваи; рычаги (обычно два) для устранения перекосов платформы и обеспечения центральной передачи нагрузки.

Натурные испытания многолетнемерзлых грунтов начинаются после достижения расчетной проектной температуры грунтов. Фактическая температура измеряется в термотрубке или термоскважине с помо-

щью термометрических кос и определяется как среднее арифметическое значение без учета мощности слоя сезонного промерзания–оттаивания [20].

При производстве испытаний в зимний период мерзлый грунт вокруг испытываемой сваи на глубину сезонного промерзания–оттаивания удаляется и заменяется на сухие опилки, песок, шлак или же выполняется более трудоёмкий процесс – пароттаивание. Если заблаговременно известны места испытаний, то до наступления морозов рекомендуется утеплить грунт у голов забитых свай: укладка опилок, увеличение снежного покрова и т. п.

В процессе испытания сваи непосредственно на месте работ заполняется «Журнал статических испытаний» и для контроля хода испытания вычерчивается график зависимости осадки от нагрузки  $S=f(P)$ .

#### **Инженерно-геокриологическая характеристика участка**

В административном отношении площадка проведения испытаний свай расположена в северо-западной части Амурской области, на территории Сковородинского района, неподалеку от поселка Невер.

В геоморфологическом отношении участок работ находится у подножия хребта Ильтивус, занимает территорию выположенного склона долины р. Большой Невер. Понижение рельефа наблюдается с севера на юг с уклоном 2–5°. Абсолютные отметки изменяются от 499,54 до 519,41 м. Перепад высот составляет 19,87 м. Рельеф эрозивно-денудационный [15].

Рассматриваемый район относится к умеренному климатическому поясу с муссонным климатом.

Согласно физико-географическому районированию объект находится в пределах Амуро-Зейской горнокотловинной области возвышенных равнин Амуро-Сахалинской физико-географической страны, на Приамурской равнине.

Характерной особенностью исследуемой территории является распространение «островной» и сплошной многолетней мерзлоты сливающегося и не сливающегося типов.

Инженерно-геокриологический разрез изучаемой территории до глубины 20,0 м по ранее проведенным ООО «ИПИГАЗ» изысканиям представлен комплексом различных стратиграфо-генетических комплексов: сверху залегают отложения биогенного и техногенного происхождения, подстилаемые верхнеплейстоценовыми элювиально-делювиальными и аллювиальными отложениями.

Биогенные отложения представлены торфом среднеразложившимся, твердомерзлым; техногенные – насыпным песком; элювиально-делювиальные – крупнообломочным грунтом с суглинистым и супесчаным заполнителем, суглинками и супесями с примесью органического вещества, слабозаторфованными, с различным количеством обломочного материала.

В некоторых местах описываемого участка в многолетнемерзлых породах отмечены прослои и линзы подземного льда мощностью от нескольких сантиметров до 1–2 м. Приурочены прослои и линзы обычно к верхним горизонтам мерзлых пород, чаще всего к слоям суглинков, особенно пылеватых.

Таблица 1. Характеристики инженерно-геологических элементов

Table 1. Characteristics of engineering-geological elements

Номер слоя и ИГЭ Layer number and IGE	Наименование грунта Name of the soil
Талые грунты/Thawed soils	
110000	Почвенно-растительный слой/Topsoil
251000	Насыпной грунт: щебенистый грунт с песчаным и супесчаным заполнителем, tQ <sub>IV</sub> Filled soil: crushed stone soil with sandy and sandy loam aggregate
140120	Суглинок легкий; полутвердый; щебенистый 25 до 50 %/Lean stiff clay with cobbles 25...50 %; W=0,192; W <sub>L</sub> =0,278; W <sub>p</sub> =0,179; I <sub>p</sub> =0,099; I <sub>L</sub> =0,131; ρ <sub>s</sub> =2,68; ρ=2,07; ρ <sub>d</sub> =1,74; e=0,54; S <sub>r</sub> =0,95; ε <sub>th</sub> =7,4; D <sub>sal</sub> =0,022; c <sub>n</sub> =0,042; φ <sub>n</sub> =26; E=27; R <sub>0</sub> =0,27
140210	Суглинок легкий; тугопластичный; со щебнем от 15 до 25 %/Lean firm-stiff clay with cobbles 15...25 %; W=0,217; W <sub>L</sub> =0,282; W <sub>p</sub> =0,182; I <sub>p</sub> =0,100; I <sub>L</sub> =0,350; ρ <sub>s</sub> =2,70; ρ=2,07; ρ <sub>d</sub> =1,70; e=0,59; S <sub>r</sub> =0,99; ε <sub>th</sub> =8,8; D <sub>sal</sub> =0,023; c <sub>n</sub> =0,032; φ <sub>n</sub> =23; E=26; R <sub>0</sub> =0,23
210210	Древесянный грунт водонасыщенный/Silty fine gravel saturated W=0,245; W <sub>L</sub> =0,266; W <sub>p</sub> =0,170; I <sub>p</sub> =0,096; I <sub>L</sub> =0,780 ρ <sub>s</sub> =2,70; ρ=1,95; ρ <sub>d</sub> =1,57; e=0,719; S <sub>r</sub> =0,92; c <sub>n</sub> =0,07; φ <sub>n</sub> =39; E=43; R <sub>0</sub> =0,50
Мерзлые грунты/Frozen soils	
110000	Почвенно-растительный слой/Topsoil
121020	Торф мерзлый (льдиность < 0,45); криотекстура слоистая; среднеразложившийся/Frozen peat (iciness < 0,45); cryotexture layered; medium-decomposed W <sub>tot</sub> =1,97; ρ <sub>s</sub> =1,97; ρ <sub>f</sub> =1,11; ρ <sub>d</sub> =0,37; i <sub>i</sub> =0,39; I <sub>L</sub> =0,80; D <sub>dp</sub> =33; λ <sub>th</sub> =0,93; λ <sub>f</sub> =1,39; C <sub>th</sub> =3,78; C <sub>f</sub> =2,73; δ=0,01-0,1; ε <sub>th</sub> >10,0
141000	Суглинок мерзлый; нельдистый; криотекстура массивная; незасоленный/Lean clay frozen; not icy; the cryotexture is massive; unsalted; W <sub>tot</sub> =0,184; W <sub>m</sub> =0,184; p <sub>f</sub> =2,01; p <sub>s</sub> =2,70; ρ <sub>d</sub> =1,70; e <sub>f</sub> =0,59; S <sub>r</sub> =1,00; W <sub>L</sub> =0,290; W <sub>p</sub> =0,181; I <sub>p</sub> =0,109; (I <sub>L</sub> =0,028); i <sub>i</sub> =0,00; D <sub>sal</sub> =0,019; δ=0,0; T <sub>bf</sub> =-0,2; C <sub>th</sub> =2,85; C <sub>f</sub> =2,09; λ <sub>th</sub> =1,20; λ <sub>f</sub> =1,64; m <sub>f</sub> =0,07; E=11,1; A <sub>th</sub> =0,025; m=0,065; C <sub>eq</sub> =0,117; R <sub>af</sub> =0,067; t=-0,5; R <sub>af(-0,5)}</sub> =0,069; t=-0,5; R <sub>af(-0,8)}</sub> =0,070
141100	Суглинок мерзлый; слабльдистый; криотекстура слоистая/Lean clay frozen; slightly icy; cryotexture layered W <sub>tot</sub> =0,266; W <sub>L</sub> =0,282; W <sub>p</sub> =0,175; I <sub>p</sub> =0,107; I <sub>L</sub> =0,85; ρ <sub>s</sub> =2,71; ρ <sub>f</sub> =1,83; ρ <sub>d</sub> =1,45; e <sub>f</sub> =0,87; i <sub>i</sub> =0,10; W <sub>m</sub> =0,205; S <sub>r</sub> =1,00; i <sub>tot</sub> =0,227; λ <sub>th</sub> =1,44; λ <sub>f</sub> =1,68; C <sub>th</sub> =3,00; C <sub>f</sub> =2,10; m <sub>f</sub> =0,062; A <sub>th</sub> =0,043; m=0,072; C <sub>eq</sub> =0,137; t=-1,0; R <sub>af</sub> =0,063; t=-0,5; R <sub>af(-0,5)}</sub> =0,064; R <sub>af(-0,8)}</sub> =0,065; R <sub>af(-3,0)}</sub> =0,155; T <sub>bf</sub> =-0,18; ε <sub>th</sub> =9,0
141110	Суглинок мерзлый; слабльдистый; криотекстура массивная с включениями щебня (галечки) от 15 до 25 %/Lean clay frozen; slightly icy; the cryotexture is massive; with cobbles 15...25 % W <sub>tot</sub> =0,165; W <sub>L</sub> =0,273; W <sub>p</sub> =0,170; I <sub>p</sub> =0,103; I <sub>L</sub> =0,11; ρ <sub>s</sub> =2,71; ρ <sub>f</sub> =2,06; ρ <sub>d</sub> =1,74; e <sub>f</sub> =0,645; i <sub>i</sub> =0,151; W <sub>m</sub> =0,205; S <sub>r</sub> =0,52; i <sub>tot</sub> =0,27; λ <sub>th</sub> =1,48; λ <sub>f</sub> =1,66; C <sub>th</sub> =2,68; C <sub>f</sub> =2,26; ε <sub>th</sub> =6,6; R <sub>af</sub> =0,066; t=-0,5; R <sub>af(-0,5)}</sub> =0,066; R <sub>af(-0,8)}</sub> =0,067; R <sub>af(-3,0)}</sub> =0,158
141111	Суглинок мерзлый; слабльдистый; криотекстура массивная; с включениями щебня (галечки) от 15 до 25 %; с примесью органического вещества/Lean clay frozen; slightly icy; the cryotexture is massive; with cobbles 15...25 % and organic matter W <sub>tot</sub> =0,343; W <sub>L</sub> =0,285; W <sub>p</sub> =0,190; I <sub>p</sub> =0,098; I <sub>L</sub> =1,61; ρ <sub>s</sub> =2,68; ρ <sub>f</sub> =1,88; ρ <sub>d</sub> =1,40; e <sub>f</sub> =0,91; i <sub>i</sub> =0,18; W <sub>m</sub> =0,220; S <sub>r</sub> =1,00; I <sub>L</sub> =0,08; i <sub>tot</sub> =0,360; λ <sub>th</sub> =1,41; λ <sub>f</sub> =1,59; C <sub>th</sub> =2,998; C <sub>f</sub> =2,15; T <sub>bf</sub> =-0,30; ε <sub>th</sub> =7,0-10,0; A <sub>th</sub> =0,188; m=0,313; C <sub>eq</sub> =0,466; R <sub>c</sub> =0,551; t=-1,0; R <sub>af</sub> =0,060; t=-0,5; R <sub>af(-0,5)}</sub> =0,062; R <sub>af(-0,8)}</sub> =0,065; R <sub>af(-3,0)}</sub> =0,173
141120	Суглинок щебенистый (галечниковый) мерзлый слабльдистый криотекстура массивная/Lean clay frozen; slightly icy; the cryotexture is massive; with cobbles W <sub>tot</sub> =0,217; W <sub>L</sub> =0,272; W <sub>p</sub> =0,170; I <sub>p</sub> =0,102; I <sub>L</sub> =0,461; ρ <sub>s</sub> =2,70; ρ <sub>f</sub> =2,10; ρ <sub>d</sub> =1,73; e <sub>f</sub> =0,56; i <sub>i</sub> =0,03; W <sub>m</sub> =0,200; S <sub>r</sub> =1,00; i <sub>tot</sub> =0,22; λ <sub>th</sub> =1,33; λ <sub>f</sub> =1,75; C <sub>th</sub> =2,73; C <sub>f</sub> =2,07; ε <sub>th</sub> =8,2; m <sub>f</sub> =0,277; E=2,89; C <sub>eq</sub> =0,033; R <sub>af</sub> =0,072; t=-0,5; R <sub>af(-0,5)}</sub> =0,062; R <sub>af(-0,8)}</sub> =0,066; R <sub>af(-3,0)}</sub> =0,156
141220	Суглинок щебенистый (галечниковый); мерзлый; льдистый; криотекстура массивная/Lean clay frozen; icy; the cryotexture is massive; with cobbles W <sub>tot</sub> =0,493; W <sub>L</sub> =0,272; W <sub>p</sub> =0,193; I <sub>p</sub> =0,079; I <sub>L</sub> =3,79; ρ <sub>s</sub> =2,67; ρ <sub>f</sub> =2,03; ρ <sub>d</sub> =1,36; e <sub>f</sub> =0,96; i <sub>i</sub> =0,33; W <sub>m</sub> =0,223; S <sub>r</sub> =1,00; i <sub>tot</sub> =0,56; λ <sub>th</sub> =0,49; λ <sub>f</sub> =0,63; C <sub>th</sub> =2,62; C <sub>f</sub> =2,25; δ=0,14; ε <sub>th</sub> =7,0-10,0; R <sub>af</sub> =0,055; t=-0,5; R <sub>af(-0,5)}</sub> =0,056; R <sub>af(-0,8)}</sub> =0,058; R <sub>af(-3,0)}</sub> =0,149
151100	Супесь мерзлая, слабльдистая, криотекстура слоистая/Silty clay frozen, slightly icy, the cryotexture is layered W <sub>tot</sub> =0,225; W <sub>L</sub> =0,249; W <sub>p</sub> =0,188; I <sub>p</sub> =0,06; I <sub>L</sub> =0,61; ρ <sub>s</sub> =2,66; ρ <sub>f</sub> =1,94; ρ <sub>d</sub> =1,58; e <sub>f</sub> =0,68; i <sub>i</sub> =0,06; W <sub>m</sub> =0,114 S <sub>r</sub> =0,68; i <sub>tot</sub> =0,20; λ <sub>th</sub> =1,81; λ <sub>f</sub> =1,93; C <sub>th</sub> =2,96; C <sub>f</sub> =2,34; δ=0,20; ε <sub>th</sub> >7,0; R <sub>af</sub> =0,071; t=-0,5; R <sub>af(-0,5)}</sub> =0,075 R <sub>af(-0,8)}</sub> =0,079; R <sub>af(-3,0)}</sub> =0,17
221010	Щебенистый грунт мерзлый, слабльдистый/Crushed cobbles frozen, slightly icy W <sub>tot</sub> =0,161; W <sub>L</sub> =0,238; W <sub>p</sub> =0,158; I <sub>p</sub> =0,08; I <sub>L</sub> =0,04; ρ <sub>s</sub> =2,70; ρ <sub>f</sub> =2,054 ρ <sub>d</sub> =1,774 e <sub>f</sub> =0,53; i <sub>i</sub> =0,092; W <sub>m</sub> =0,161; S <sub>r</sub> =0,90; i <sub>tot</sub> =0,32; λ <sub>th</sub> =2,24; λ <sub>f</sub> =1,72; C <sub>th</sub> =3,02; C <sub>f</sub> =2,07; A <sub>th</sub> =0,04; m=0,040, ε <sub>th</sub> =0,7

Примечание. Основные буквенные обозначения величин: W – естественная влажность, д. е.; W<sub>m</sub> – влажность мерзлого грунта, расположенного между льдистыми включениями, д. е.; W<sub>tot</sub> – суммарная влажность мерзлого грунта, д. е.; W<sub>L</sub> – влажность грунта на границе текучести, д. е.; W<sub>p</sub> – влажность грунта на границе раскатывания, д. е.; I<sub>p</sub> – число пластичности, д. е.; I<sub>L</sub> – показатель текучести, д. е.; ρ<sub>s</sub> – плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>; ρ<sub>d</sub>f – плотность мерзлого грунта в сухом состоянии, г/см<sup>3</sup>; ρ – плотность грунта, г/см<sup>3</sup>; ρ<sub>f</sub> – плотность мерзлого грунта, г/см<sup>3</sup>; ρ<sub>d</sub> – плотность талого грунта в сухом состоянии, г/см<sup>3</sup>; e<sub>f</sub> – коэффициент пористости мерзлого грунта, д. е.; e – коэффициент пористости, д. е.; i<sub>i</sub> – льдистость грунта за счет ледяных включений, д. е.; i<sub>tot</sub> – суммарная льдистость, д. е.; S<sub>r</sub> – коэффициент водонасыщения, д. е.; I – относительное содержание органического вещества, д. е.; D<sub>dp</sub> – степень разложения торфа, %; R<sub>c</sub> – предел прочности на одноосное сжатие, МПа; R<sub>0</sub> – расчетное сопротивление грунта, МПа; ε<sub>th</sub> – относительная деформация пучения, %; E – модуль деформации, МПа; c<sub>n</sub> – удельное сцепление (рекомендуемое), МПа; φ<sub>n</sub> – угол внутреннего трения (рекомендуемое), град; K<sub>f</sub> – коэффициент истираемости, д. е.; K<sub>wr</sub> – коэффициент выветрелости, д. е.; I, II, III – категория просадочности мерзлого грунта при оттаивании.  
 Note. The main letter designations of the values are: W – natural moisture; W<sub>m</sub> – moisture of frozen soil located between ice inclusions; W<sub>tot</sub> – total moisture of frozen soil; W<sub>L</sub> – liquid limit; W<sub>p</sub> – plastic limit; I<sub>p</sub> – plasticity index; I<sub>L</sub> – liquidity index; ρ<sub>s</sub> – density of solid particles, g/cm<sup>3</sup>; ρ<sub>d</sub>f – dry density of frozen soil, g/cm<sup>3</sup>; ρ – density of soil, g/cm<sup>3</sup>; ρ<sub>f</sub> – density of frozen soil, g/cm<sup>3</sup>; ρ<sub>d</sub> – dry density of thawed soil, g/cm<sup>3</sup>; e<sub>f</sub> – void ratio of frozen soil; e – void ratio; i<sub>i</sub> – iciness of the soil due to ice inclusions; i<sub>tot</sub> – total iciness; S<sub>r</sub> – degree of saturation; I<sub>r</sub> – relative content of organic matter; D<sub>dp</sub> – degree of decomposition of peat, %; R<sub>c</sub> – uniaxial compressive strength, MPa; R<sub>0</sub> – calculated soil resistance, MPa; e<sub>f</sub> – relative heave deformation, %; E – modulus of deformation, MPa; c<sub>n</sub> – specific cohesion (recommended), MPa; φ<sub>n</sub> – angle of internal friction (recommended), deg; K<sub>f</sub> – coefficient of abrasion; K<sub>wr</sub> – coefficient of weathering; I, II, III – category of subsidence frozen ground during thawing.

Расчетная глубина сезонного промерзания для глинистых грунтов равна 3,10 м, крупнообломочных грунтов – 4,70 м.

Нормативная глубина сезонного оттаивания для торфа – 0,80 м, супесей и суглинков изменяется от 2,0 до 3,5 м, в крупнообломочных грунтах – 4,0 м.

На исследованном участке к специфическим грунтам отнесены органоминеральные и органические грунты, а также техногенные грунты.

Гидрография рассматриваемого участка работ представлена бассейном реки Амур.

Сейсмичность площадки строительства оценивается в 7 баллов.

По сложности инженерно-геологических условий территории классифицируется как сложная.

На территории проведения работ выделено два слоя, четыре инженерно-геологических элемента (ИГЭ) для талых и восемь ИГЭ мерзлых грунтов. Характеристики физико-механических свойств, выделенных ИГЭ, приведены в табл. 1.

Грунтовые воды на площадке вскрыты на глубинах от 2,0 до 12,0 м. Воды безнапорные, водовмещающими породами являются щебенистые и дресвяные грунты, а также суглинки и супеси с различным содержанием крупнообломочного материала. Основным источником питания горизонта являются атмосферные осадки. Направление грунтового потока и разгрузка подземных вод осуществляется в сторону реки Б. Невер.

На поверхности земли повсеместно наблюдаются опасные процессы и явления, связанные с промерзанием и оттаиванием мерзлых грунтов – морозобойные трещины, наледеобразование, бугры пучения, солифлюкция. На территории происходит повсеместное заболачивание.

Рабочей документацией предусмотрено строительство по I принципу в условиях вечной мерзлоты, т. е. с дальнейшим сохранением природного состояния многолетнемерзлых пород как в процессе строительства, так и в течение всего периода эксплуатации. Для обеспечения требуемого температурного режима грунтов основания и несущей способности свай на весь период эксплуатации сооружения проектом предусматривается установка вертикальных термостабилизаторов грунта (ТСГ).

#### **Результаты контрольных исследований грунтов натурными сваями**

Основным объектом изучения является несколько зданий повышенного и нормального уровня ответственности, расположенных в одинаковых инженерно-геокриологических условиях (участки со сплошной мерзлотой): здание лабораторного корпуса, канализационная насосная станция очищенных стоков, канализационная насосная станция бытовых стоков, блок-бокс котельной, эстакады под коммуникации, канализационная насосная станция промстоков, блочно-комплектная трансформаторная подстанция, здание контрольно-пропускного пункта и станция подготовки питьевой воды.

В качестве фундамента приняты буроопускные металлические сваи диаметром 219 мм длиной 12,0 м,

с острием 0,35 м, погруженные с применением лидерных скважин диаметром 320 мм. Испытания статическими вдавливающими нагрузками производились в соответствии с требованиями и указаниями ГОСТ 5686-2020.

Нагружение свай при испытании на вдавливание производили отдельными ступенями: для стандартных первые три ступени равны 1/5 и далее 1/10 от максимальной нагрузки (рис. 1), для ускоренных – 1/8 (рис. 2). Величина ступени принималась на протяжении всего опыта постоянной и контролировалась по показаниям на манометре точных измерений (класс точности 0,6).

Значение давления, передаваемого домкратом на испытываемую сваю, на манометре фиксировалось исходя из предварительных математических расчетов, основанных на учете площади поперечного сечения и силы штока гидроцилиндра.

За максимальную нагрузку принимали нагрузку, превышающую проектную в 3,0 раза при стандартных испытаниях и в 4–5 для ускоренных.

К испытаниям приступали только после достижения грунтами требуемого проектом температурного режима, равного минус 0,3 °С.

Испытание свай заканчивалось при достижении максимальной нагрузки. Если суммарная осадка достигала значения в 25,0 мм, то наступал «срыв» свай и испытание прекращалось.

После каждой ступени нагрузки на сваю отсчеты по приборам снимались в следующей последовательности:

- при стандартном опыте – первый отсчет сразу после передачи нагрузки, затем через интервалы времени в 0,5–1–2–4–8–16–24 часов;
- при ускоренном опыте – первый и второй отсчеты перед и после нагружения соответственно, затем последовательно в течение часа через каждые 15 минут 4 отсчета и далее через каждые 60 минут до окончания ступени нагружения.

Разгрузку испытываемой сваи проводили ступенями с наблюдением за упругой деформацией грунтов. За значение давления на 3-й и 5-й ступенях разгрузки принимали величину давления, равную при этих же ступенях в ходе нагрузки, следующие ступени вдвое больше, чем при нагрузке.

За критерий условной стабилизации при ускоренных испытаниях принимали скорость снижения нагрузки, равную 0,02 от нагрузки на предыдущей ступени за последние 4 часа наблюдений.

Суммарное время проведения опыта для одной сваи составляло 170 часов при стандартных испытаниях и 34 часа при ускоренных.

До начала опыта и после его окончания выполнялись замеры температуры грунтов. Суммарное время выдержки термометрической косы составляло 12 часов.

Величина измеренной температуры грунтов на глубине нулевых годовых колебаний температур изменяется от минус 0,4 до минус 0,7 °С.

Процесс с изменением нагрузки и взятием отсчетов по измерительным приборам при статических испытаниях велся непрерывно от начала до оконча-

ния опыта, при этом обеспечивалось постоянство давления на манометре за счет своевременной подкачки масла при необходимости – 1 подкачка в 30 минут.



*Рис. 1. Испытание грунтов сваей стандартным методом*

*Fig. 1. Soil testing with a pile by standard method*



*Рис. 2. Испытание грунтов сваей ускоренным методом*

*Fig. 2. Soil testing with a pile by accelerated method*

Камеральная обработка результатов контрольных испытаний в многолетнемерзлых грунтах базировалась на основе выполнения условия:  $F \leq F_u / \gamma_n$  ( $F$  – проектная предельная величина нагрузки на основание;  $F_u$  – несущая способность, полученная в ходе натурального опыта;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности) с учётом рекомендаций ГОСТ 5686-2020 и СП 25.13330.2020.

Несущая способность сваи  $F_u$  по результатам полевых испытаний определялась как:

$$F_u = \gamma_t * k * \frac{F_{u,n}}{\gamma_g},$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий различие в условиях работы опытной и проектируемой сваи;  $F_{u,n}$  – предельно длительное сопротивление сваи;  $\gamma_g$  – коэффициент надежности по грунту.

Предельно длительное сопротивление  $F_{u,n}$  вычисляли по формуле:

$$F_{u,n} = \gamma_t * \gamma_c * (RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i}),$$

где  $\gamma_t$  и  $\gamma_c$  – коэффициенты температурный и условий работы соответственно;  $R$  – расчетное сопротивление грунта в основании сваи;  $A$  – площадь сваи;  $R_{af,i}$  и  $A_{af,i}$  – расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности смерзания сваи и площадь смерзания в пределах расчетного слоя соответственно;  $n$  – количество расчетных слоев грунта.

Значение несущей способности сваи рассчитывалось без учета мощности слоя сезонного промерзания-оттаивания (СМС-СТС).

При расчете несущей способности учитывали дополнительные коэффициенты: 0,9 (территория попадает в зону сейсмичности 7 баллов) и 0,65 (кратковременность испытания).

В обработке использовали всего 22 испытания свай, выполненные различными методиками – по 11 штук для каждой на 11 сооружениях, т. е. как минимум по 1 свае каждой методикой для каждого из рассматриваемых участков.

Территория для выполнения опытных работ имела размеры 300×300 м, инженерно-геокриологические условия для каждого здания и сооружения сопоставимы.

Интерпретация результатов испытаний, полученных различными методиками, отображена в табл. 2.

Частное значение предельно длительного сопротивления сваи по результату испытания с динамометрическим нагружением определяли в результате построения графика  $P=f(T)$  как значение нагрузки на последней ступени, при которой наступает условная стабилизация нагрузки, т. е. ее относительное постоянство [19] (рис. 3).

За частное значение предельно длительного сопротивления сваи по результату стандартного испытания многолетнемерзлых грунтов свай принимали величину передаваемой наибольшей нагрузки с коэффициентом 0,65, учитывающим кратковременность испытания – 7 суток (рис. 4).

**Таблица 2.** Сводная таблица результатов ускоренных и стандартных испытаний мерзлых грунтов сваями на вдавливающую нагрузку

**Table 2.** Summary table of the results of accelerated and standard tests of frozen soils with piles for a pressing load

Свая/Pile							
Номер/Number	Максимальная нагрузка при испытании, кН Maximum test load, kN	Нормативное значение предельно длительного сопротивления, кН Normative value of the extremely long resistance, kN	Суммарная осадка, мм Total settlement, mm	Несущая способность, кН, для T °C грунта Bearing capacity, kN, for T °C of the soil		Расчетная нагрузка, кН Estimated load, kN	
				При испытании During the test	По расчету (п.7.2-7.6) СП 25.13330 By calculation (p.7.2-7.6) SP 25.13330	по испытаниям by the tests	по проекту by the project
Ускоренное испытание/Accelerated test							
1у	400	260	0,85	344,36	281,38	158	90
2у	300	195	0,77	517,40	494,46	139	75
3у	420	273	0,86	301,26	301,26	203	105
4у	556	361	0,64	1213,15	931,28	206	139
5у	400	260	0,97	254,75	214,59	163	75
6у	400	260	0,72	241,11	205,08	164	87
7у	680	442	2,08	1021,66	865,91	279	170
8у	800	520	2,62	452,71	378,84	324	170
9у	400	260	1,13	409,78	368,06	174	99
10у	1000	650	2,03	1243,92	878,69	312	250
11у	580	377	0,83	320,39	300,21	263	145
Стандартное испытание/Standard test							
1с	360	234	1,04	318,70	255,95	140	120
2с	470	306	2,39	587,97	532,12	206	157
3с	370	370	0,85	306,37	278,41	163	123
4с	435	283	0,75	396,69	367,30	195	145
5с	300	195	6,15	812,65	685,99	122	99
6с	258	168	1,32	463,65	420,44	113	86
7с	750	488	0,97	549,75	441,76	291	250
8с	450	293	1,27	343,00	300,55	191	150
9с	450	293	0,73	256,50	249,35	211	150
10с	600	390	1,69	433,18	405,02	271	170
11с	600	390	1,87	1021,66	865,91	246	170

#### Сравнительный анализ полученных результатов

Итог всей исследовательской работы состоял в сравнении и анализе результатов камеральной обработки несущей способности свай, полученной в ходе выполнения натуральных испытаний по стандартной и ускоренной методикам для многолетнемерзлых грунтов.

Сводная табл. 2 показывает, что осредненная величина осадки свай при ускоренных испытаниях равна 1,23 мм, а для стандартных – 1,73 мм, ошибка по среднему значению – 29 %.

Величины средних значений нагрузок на свайные фундаменты, полученные в результате натуральных контрольных испытаний грунтов сваями, при ускоренных больше, чем при стандартных, ошибка – 10 %: 217 кН > 195 кН (рис. 5).

Следует отметить, что в сравнительном анализе участвовали сваи, одинаковые по длине и по диаметру.

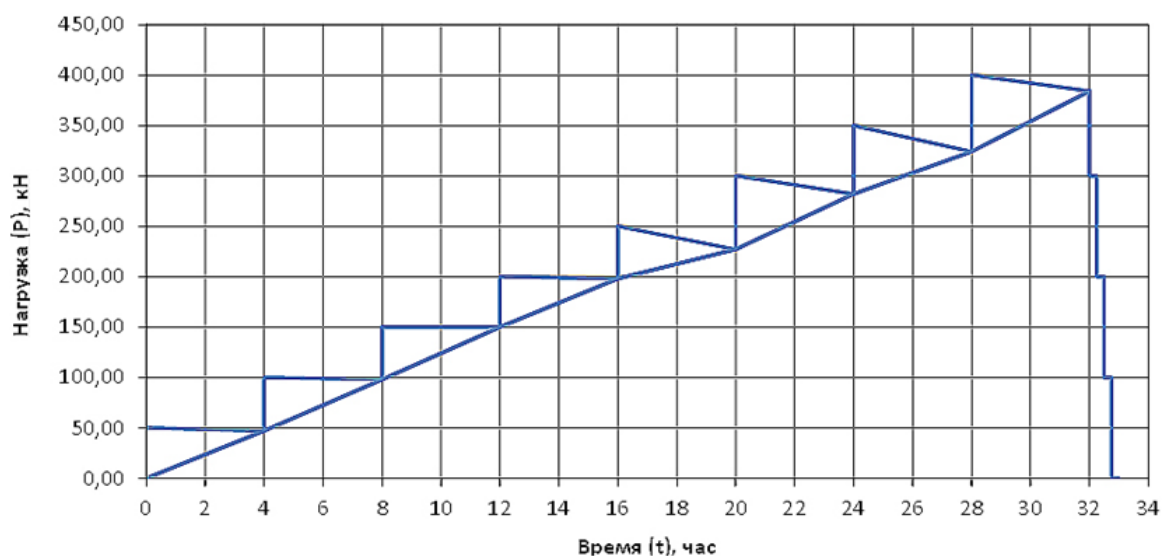


Рис. 3. График изменения нагрузки (P) во времени (t) при испытании ускоренным методом для сваи № 1  
 Fig. 3. Graph of load change (P) in time (t) during accelerated testing for pile no. 1



Рис. 4. График изменения осадки (S) от нагрузки (P) при испытании стандартным методом для сваи № 5с  
 Fig. 4. Graph of the change in settlement (S) from load (P) when tested by the standard method for pile no. 5с

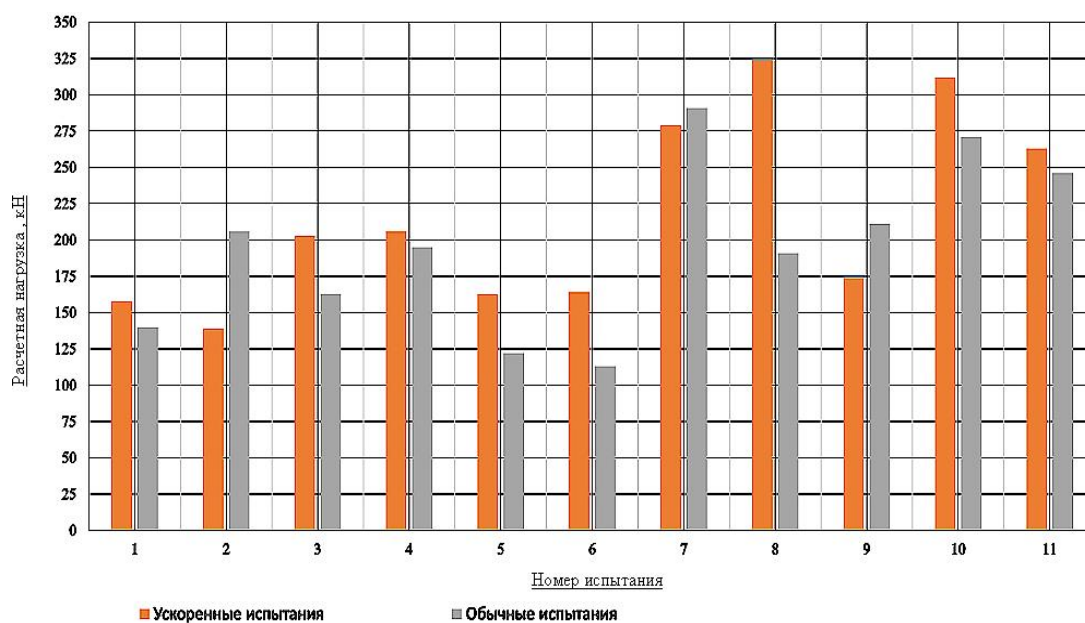


Рис. 5. Диаграмма изменения расчетной нагрузки по результатам полевых испытаний  
 Fig. 5. Diagram of the calculated load change based on the results of field tests

Динамометрические испытания значительно сокращают время выполнения опыта и, следовательно, ускоряют процесс получения необходимой разрешительной документации для дальнейшего массового погружения всего свайного основания и ведения строительно-монтажных работ верхних конструкций.

Однако данные испытания не отражают действительности природы процесса взаимодействия системы «мерзлое основание – фундамент» по причине специфических свойств, характерных для многолетнемерзлых грунтов, а именно быстрое нагружение на мерзлые грунты приводит к увеличению их «мгновенной» прочности, в то время как при длительном процессе наблюдаются свойства ползучести.

Следовательно, время, отведенное на выдержку каждой ступени нагружения испытываемой сваи, – 4 часа, будет не слишком мало для оценки несущей способности.

Еще одним из важных требований при выполнении ускоренных испытаний является выполнение рекомендаций, описанных в пункте Р.4 приложения Р ГОСТ 5686-2020, а именно: «Нагрузка при испытании должна быть доведена до конечного значения, которая оказывается практически постоянной на последних трех ступенях нагружения» [20 и др.].

Анализируя данное требование, можно сделать вывод, что максимальная нагрузка, принятая в ходе проведения опытов и равная от 250 до 1000 кН, в 3–4 раза больше проектной (75–250 кН) и явно недостаточна, так как постоянство нагрузки на последних ступенях не соблюдается.

Следовательно, для получения достоверной информации о несущей способности свай, соответствующей требованиям нормативной документации, за величину максимальной нагрузки следует принимать большее значение, чем принято в ходе выполнения опытов.

Данный вывод подтверждается результатами ускоренных испытаний, проведенных на территории села Мыс Каменный в Ямальском районе Ямало-Ненецкого автономного округа на объектах линейной части в составе напорного нефтепровода (крановые узлы, балочные переходы, подвижные опоры, прожекторные мачты): так, для балочного перехода проектная нагрузка – 57 кН, при испытаниях – 400 кН, т. е. в 7 раз больше проектной, что является достаточной величиной для проведения опыта в соответствии со всеми требованиями (рис. 6).

Для сравнения выявлялись участки со средней температурой грунта в диапазоне от  $-0,3$  до  $-0,7$  °С, такие же как на исследуемом участке, и преобладание многолетнемерзлых грунтов сплошного распространения сливающего и не сливающего типов, сложенных пре-

имущественно суглинистыми грунтами с прослоями супесей и включением обломочного материала.

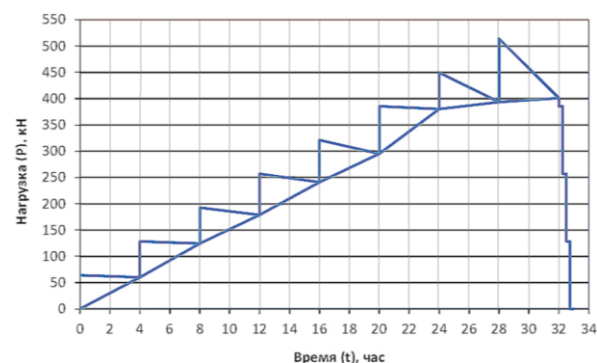


Рис. 6. График изменения нагрузки ( $P$ ) на сваю во времени ( $t$ ) при испытании ускоренным методом на территории села Мыс Каменный

Fig. 6. Graph of the load change ( $P$ ) on the pile in time ( $t$ ) when tested by the accelerated method on the territory of the village Mys Kamenny

При этом для выполнения требования пункта Р.4 ГОСТ 5686-2020 – конечное значение нагрузки на последних трех ступенях нагружения практически постоянное, необходимо большее количество пригруза, т. е. в 7 раз больше, чем проектная нагрузка, при динамометрических испытаниях, что с точки зрения охраны труда небезопасно.

С экономической точки зрения стоимость выполнения строительно-монтажных работ на подготовительном этапе (погрузочно-разгрузочные работы, количество пригруза), необходимых для проведения стандартных испытаний, больше в 2,7 раза, чем при ускоренных, в части изыскательских работ разница в стоимости для стандартных в 1,2 раза больше.

Предварительный вывод по результатам анализа показывает существенное экономическое расхождение в методиках проведения испытаний свай, а также малую достоверность несущей способности свай при ускоренных испытаниях в связи с природой мерзлых грунтов и их поведением под различными видами нагрузок (длительные или краткосрочные).

Эффективность ускоренной методики также вызывает сомнение по причине проведения большого комплекса подготовительных работ для достижения необходимого фактического характера нагрузок на сваю.

Несмотря на то, что данная методика регламентирована нормативными документами (ГОСТ 5686-2020) с рядом оговорок, ее использование рекомендовали бы лишь для предварительной оценки несущей способности свайных фундаментов в ходе строительства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Numerical simulation of the influence of pile geometry on the heat transfer process of foundation soil in permafrost regions / J. Zhang, Z. Zhang, S. Zhang, A. Brouchkov, C. Xie, S. Zhu // Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – V. 38. – P. 102324.
2. Influence of seasonal freezing-thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions / J. Guan,

- X. Zhang, X. Chen, M. Ding, W. Wang, S. Yu // Cold Regions Science and Technology. – 2022. – V. 199. – P. 103581.
3. Impacts of permafrost degradation on infrastructure / J. Hjort, D. Streletskiy, G. Doré, Q. Wu, K. Bjella, M. Luoto // Nature Reviews Earth & Environment. – 2022. – V. 3. – № 1. – P. 24–38.
4. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone // International Journal for Computational

- Civil and Structural Engineering. – 2022. – V. 18. – № 1. – P. 141–150.
5. Experimental study on thermal regime and frost jacking of pile foundation during operation period in permafrost regions / Y. Shang, F. Niu, J. Fang, L. Wu // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – V. 10. – P. 70–81.
  6. Строкова Л.А., Нечаев Д.А. Роль опасных геологических процессов при эксплуатации нефтепровода «Чаянда-ВСТО» // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 86–98.
  7. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 41–55.
  8. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – Iss. 8. – P. 5517–5530.
  9. Улицкий В.М., Шашкин А.Г. Геотехническое сопровождение реконструкции городов. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 327 с.
  10. A nonlinear approach for time dependent settlement analysis of a single pile and pile groups / S. Feng, X. Li, F. Jiang, L. Lei, Z. Chen // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2017. – V. 54. – Iss. 1. – P. 7–16.
  11. Aziz H.Y., Maula B.H. Estimation of negative skin friction in deep pile foundation using the practical and theoretically approaches // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – V. 13. – № 10. – P. 3340–3349.
  12. Bjerrum L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering: Proc. of the 8th International Conference*. – Moscow, 1973. – V. 3. – P. 111–159.
  13. Григорян А.А. Расчет несущей способности свай // *Проблемы свайного фундаментостроения: Труды VI международной конференции*. – М., 1998. – Т. 1 – С. 37–42.
  14. Долматов Б.И., Лапшин Ф.К. Оценка несущей способности свай при массовом их применении // *Совещание-семинар по обмену опытом проектирования и возведения свайных фундаментов*. – М., 1966. – С. 2–6.
  15. Кулешов А.П., Пендин В.В. Влияние методики определения свойств грунтов в численных расчетах деформаций // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 63–74.
  16. Кургузов К.В., Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Оценка несущей способности свай. Методы расчета и проблематика // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 7–25.
  17. Кургузов К.В., Фоменко И.К. Сравнение методик расчета несущей способности свай // *Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ): Материалы Международной научно-практической конференции*. – М., 2018. – Т. 2. – С. 254–255.
  18. Пендин В.В. Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии. – М.: КДУ, 2009. – 350 с.
  19. Пилягин А.В. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений. 3-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Изд-во АСВ, 2017. – 398 с.
  20. ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. – М.: Стандартинформ, 2021. – 57 с.
  21. ГОСТ 25358-2020. Грунты. Метод полевого определения температуры. – М.: Стандартинформ, 2021. – 17 с.
  22. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах. НИИОСП им. Н.М. Герсевича. – М.: Стройиздат, 1980. – 303 с.
  23. Руководство по проектированию свайных фундаментов. НИИОСП им. Н.М. Герсевича. – М.: Стройиздат, 1980. – 151 с.
  24. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 138 с.
  25. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2016. – 69 с.
  26. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Стандартинформ, 2020. – 110 с.

Поступила 31.10.2022 г.

Дата рецензирования: 21.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Николенко И.А.**, магистрант кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

**Кулешов А.П.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

**Строкова Л.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 624.131

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF STANDARD AND ACCELERATED FIELD TESTS OF PILE FOUNDATIONS IN PERMAFROST SOILS

Irina A. Nikolenko<sup>1</sup>,  
qwnwhalle@bk.ru

Alexander P. Kuleshov<sup>1</sup>,  
87kuleshov@mail.ru

Lyudmila A. Stroková<sup>2</sup>,  
sla@tpu.ru

<sup>1</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University,  
23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the work consists in the analysis of the results of field control tests of soils with a static load on indentation with full-scale piles, performed according to accelerated and standard methods in conditions of permafrost spreading. The timing of soil testing by piles allows you to adjust and accelerate the pace of construction and installation work on the device of the «zero cycle» of foundations, reduce the time for making various design decisions and erecting technical systems aimed at ensuring the mechanical safety of the designed structures in terms of creating and maintaining the required temperature and strength regime of the foundation soils (thermal stabilization of soils) and its further control during the construction and operation of buildings and structures (geotechnical monitoring). The paper analyzes two calculation methods, provides an analysis of the rational use of each method.

**Objective:** calculation and comparison of design loads treated during the production of static tests for pressing piles into the ground, based on the requirements of regulated and existing measurement methods (standard and accelerated) in cryolithozone conditions and assessment of the possibility of using one or another calculation method.

**Methods.** At the first stage of the study, the issues of organization and technology of production of field control tests of piles in the north-western part of the Amur region were considered by evaluating the information displayed in the domestic regulatory documentation: SP 25.13330.2020 and SS 5686-2020. The engineering and geocryological conditions of the work area are described. At the second stage, an assessment of 11 field tests was carried out, calculations and comparative analysis of the bearing capacity and design loads on piles were carried out according to the test results.

**Results.** The obtained data are recommended to be used in the construction of buildings and structures on pile foundations in conditions of the spread of permafrost soils for monitoring and operational management of the pace of construction of the «zero cycle» of foundations, for assessing the economic component of the project and obtaining reliable and necessary data on the state of the geological environment.

### Key words:

bearing capacity, working tested pile, comparable soil tests with piles, comparative analysis, field tests, deformations, permafrost soil, temperature regime, design load, foundation, pile foundations.

### REFERENCES

- Zhang J., Zhang Z., Zhang S., Brouchkov A., Xie C., Zhu S. Numerical simulation of the influence of pile geometry on the heat transfer process of foundation soil in permafrost regions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, vol. 38, 102324.
- Guan J., Zhang X., Chen X., Ding M., Wang W., Yu S. Influence of seasonal freezing-thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, vol. 199, 103581.
- Hjort J., Streletskiy D., Doré G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, vol. 3 (1), pp. 24–38.
- Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2022, vol. 18 (1), pp. 141–150.
- Shang Y., Niu F., Fang J., Wu L. Experimental study on thermal regime and frost jacking of pile foundation during operation period in permafrost regions. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10, pp. 70–81.
- Stroková L.A., Nechaev D.A. Role of hazardous geological processes in the operation of the Chayanda-ESPO oil pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 86–98. In Rus.
- Stroková L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoe oil and gasfield – Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.
- Stroková L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, Iss. 8, pp. 5517–5530
- Ulitsky B. M., Shashkin A. G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie rekonstruktsii gorodov* [Geotechnical support urban renewal]. Moscow, DIA Publ., 1999. 327 p.
- Feng S., Li X., Jiang F., Lei L., Chen Z. A nonlinear approach for time dependent settlement analysis of a single pile and pile groups. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, vol. 54 (1), pp. 7–16.
- Aziz H.Y., Maula B.H. Estimation of negative skin friction in deep pile foundation using the practical and theoretically approaches. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13 (10), pp. 3340–3349.
- Bjerrum L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering: Proc. of the 8th International Conference*. Moscow, 1973. Vol. 3, pp. 111–159.
- Grigoryan A.A. Raschet nesushchey sposobnosti svay [Calculation of bearing capacity of piles]. *Problemy svaynogo fundamentostroeniya. Trudy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Problems of

- pile foundation construction. Proc. of the VI International Conference]. Moscow, 1998. Vol. 1, pp. 37–42.
14. Dolmatov B.I., Lapshin F.K. Otsenka nesushchey sposobnosti svay pri massovom ikh primenenii [Evaluation of the bearing capacity of piles for mass application]. *Soveshchanie-seminar po obmenu opytom proektirovaniya i vozdeystviya svaynykh fundamentov* [Meeting seminar on the exchange of experience in the design and erection of pile foundations]. Moscow, 1966. pp. 2–6.
  15. Kuleshov A.P., Pendin V.V. Influence of methods for determining soil properties in numerical calculations of deformations. *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 328, no. 12, pp. 63–74. In Rus.
  16. Kurguzov K.V., Fomenko I.K., Sirotkina O.N. Assessment of the bearing capacity of piles. Calculation methods and problems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 7–25. In Rus.
  17. Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Sravnenie metodik rascheta nesushchey sposobnosti svay [Comparison of methods for calculating the bearing capacity of piles]. *Strategiya razvitiya geologicheskogo issledovaniya nedr: nastoyashchee i budushchee (k 100-letiyu MGRI-RGGRU). Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Strategy for development of geological exploration of mineral resources: the present and the future (to the 100th anniversary of MGRI-RGGRU). Proc. of the International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2018. Vol. 2, pp. 254–255.
  18. Pendin V.V. *Kompleksny kolichestvenny analiz informatsii v inzhenernoy geologii* [Complex quantitative analysis of information in engineering Geology]. Moscow, KDU Publ., 2009. 350 p.
  19. Pilyagin A.V. *Proektirovanie osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy* [Design of foundations and foundations of buildings and structures]. Moscow, ASV Publ., 2017. 398 p.
  20. SP 22.13330.2016. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy* [Code of rules 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 69 p.
  21. SP 25.13330.2020. SNiP 2.02.04-88 *Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh* [Foundations and foundations on permafrost soils]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 110 p.
  22. GOST 5686-2020. *Grunty. Metody polevykh ispytaniy svayami* [Soils. Methods of field testing with piles]. Moscow, StandardInform Publ., 2021. 57 p.
  23. GOST 25358-2020. *Grunty. Metod polevogo opredeleniya temperatury* [Soils. The method of field determination of temperature]. Moscow, StandardInform Publ., 2021. 17 p.
  24. *Rukovodstvo po proektirovaniyu osnovaniy i fundamentov na vechnomerzlykh gruntakh* [Guidelines for the design of foundations and foundations on permafrost soils]. Moscow, StandardInform Publ., 1980. 303 p.
  25. *Rukovodstvo po proektirovaniyu svaynykh fundamentov* [Guidelines for the design of pile foundations]. Moscow, StandardInform Publ., 1980. 151 p.
  26. SP 50-101-2004. *Proektirovanie i ustroystvo osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy* [Design and installation of foundations and foundations of buildings and structures]. Moscow, StandardInform Publ., 2005. 138 p.

Received: 31 October 2022.

Reviewed: 21 January 2023.

#### Information about the authors

**Irina A. Nikolenko**, master's student, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

**Alexander P. Kuleshov**, Cand. Sc., associate professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

**Lyudmila A. Strokova**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.388

## ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА В СИДОАРДЖО (ПРОВИНЦИЯ ВОСТОЧНАЯ ЯВА, ИНДОНЕЗИЯ)

Адьякса Илхам Путра<sup>1</sup>,  
ilhamadiyaksa@gmail.com

Савичев Олег Геннадьевич<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Хващевская Альбина Анатольевна<sup>1</sup>,  
Garibova@yandex.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** В восточной части острова Ява (Индонезия), в провинции Восточная Ява, округе Сидоарджо, с 2006 г. функционирует крупнейший в мире грязевой вулкан. Прилегающие территории густо заселены, что определяет постоянную потребность в качественной питьевой воде. Дефицит качественной воды усугубляется влиянием грязевого вулкана.

**Цель:** оценка эколого-геохимического состояния грунтовых вод на территории, прилегающей к крупнейшему в мире грязевому вулкану в Сидоарджо (Индонезия, провинция Восточная Ява).

**Методы:** методы определения химического состава грунтовых вод, статистические методы, методы математического моделирования.

**Результаты и выводы.** Получена предварительная оценка эколого-геохимического состояния грунтовых вод в районе грязевого вулкана в Сидоарджо по результатам обследования в январе, феврале и октябре 2022 г. Показано, что грунтовые воды оцениваются как: 1) пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые на участках вне основного направления уклона земной поверхности и движения водных масс с запада-юго-запада на восток-северо-восток, ограниченно пригодные для хозяйственно-питьевого использования (использование при условии водоподготовки); 2) соленоватые, хлоридные натриевые, с высокими содержаниями Hg, I, Br, B, не пригодные для хозяйственно-питьевого использования. Повышенные концентрации Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, I, Br, B, предположительно, свидетельствуют об участии в формировании состава флюидов грязевого вулкана морских вод. Генезис Hg требует более детального изучения и, возможно, связан с локальными особенностями. В целом наиболее объективным показателем влияния на состояние именно грязевого вулкана является содержание Cl<sup>-</sup>. Даны рекомендации по проведению дальнейших гидрогеохимических исследований в Сидоарджо.

### Ключевые слова:

грязевой вулкан в Сидоарджо, Индонезия, грунтовые воды, химический состав, качество.

### Введение

Ява – один из Больших Зондских островов Малайского архипелага, расположен в пределах субдукционной границы Индо-Австралийской и Евразийской плит и считается одним из самых активных участков современного вулканизма [1]. Восточная часть Явы, административно соответствующая провинции Восточная Ява республики Индонезия, характеризуется наличием ряда грязевых вулканов. В том числе, в округе Сидоарджо (Sidoarjo) расположен крупнейший в мире грязевой вулкан Луси (Lusi – сокращение сочетания характеристики Lumpuk – «грязь» и географической привязки Sidoarjo – округ Сидоарджо), приуроченный к разлому Уотукосек (WatuKosek). Извержение этого вулкана началось 29.05.2006 г., а в качестве причин рассматриваются [2–5]:

1) антропогенное воздействие на горно-геологические условия при бурении геологоразведочной скважины на газ; работы выполняла компания PT Lapindo Brantas; на глубинах 500–1300 м были вскрыты глинистые отложения, ниже – пески, сланцы, вулканические отложения, еще ниже – карбонатные породы; скважина была обсажена до 1091 м, в 5 часов по местному времени 29.05.2006 г. при достижении глубины 2834 м

грязь (смесь глины, солёной воды и небольшого количества газа, состав которого близок к составу газа из более глубоких горизонтов рядом расположенного месторождения Вунут (Wunut)) при температуре до 100 °С вырвалась примерно в 200 м к юго-западу от скважины; первоначально объем грязи достигал 180000 м<sup>3</sup>/сут со снижением до 7000–20000 м<sup>3</sup>/сут, а её состав указывает на участие отложений в диапазоне глубин примерно от 1200–1300 до 1870 м (данные о бурении и параметрах грязевого потока в разных источниках могут различаться); в целом по результатам рентгенофазового анализа изверженное вещество по химическому составу на 44,1 % представлено SiO<sub>2</sub>, на 23,7 % – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6];

- 2) активизация разлома в результате землетрясения магнитудой 6,3, которое произошло 27.05.2006 г. примерно в 250 км к юго-западу от Сидоарджо;
- 3) естественные геотермальные процессы (ближайший вулкан Арджуно-Велиранг (Arjuno-Welirang) находится менее чем в 15 км от рассматриваемой территории).

Функционирование грязевого вулкана привело к разрушению и занесению грязевыми потоками жилых объектов на площади около 7,5 км<sup>2</sup>. Зона его влияния

охватывает 16 деревень в трех подрайонах, а именно Поронг (Porong), Тангулангин (Tanggulangin) и Джабон (Jabon). Из-за поступления грязевых потоков в реку Поронг и другие водотоки отмечены аккумуляция наносов и снижение качества речной воды, повлекшее морфологические изменения гидробионтов [7–9]. Впоследствии нарушенные земли были обнесены дамбой. Но из-за наводнений и периодической активизации грязевого вулкана для прилегающих сельских территорий сохраняется угроза непосредственного разрушения жилых и производственных объектов на прилегающей территории, а также загрязнение подземных (грунтовых) вод в районе грязевого вулкана [10]. Последнее обстоятельство с учётом существующих водных проблем самого густонаселенного острова Индонезии (большая часть воды используется для орошения, а в засушливый период наблюдается её дефицит, в результате отбора подземных вод происходит оседание земной поверхности и интрузия морских вод [11]) и определило актуальность и цель рассматриваемого исследования – оценка эколого-геохимического состояния грунтовых вод в округе Сидоарджо (Индонезия, провинция Восточная Ява) в районе грязевого вулкана Луси в 2022 г.

#### Методика исследования

Отбор проб грунтовых вод выполнен Илхамом Путра Адыякса с учетом рекомендаций [12, 13] из колодцев глубиной 6–10 м из приповерхностного слоя: 5 проб (A1–A5) – в поселении Кеденсари в районе Тангулангин округа Сидоарджо (Kedensari village, Tanggulangin, Sidoarjo) в период дождей (в среднем с ноября по март), в конце января – начале февраля 2022 г.; 5 проб (B1–B5) – в подрайоне Поронг округа Сидоарджо (Porong, Sidoarjo) в конце засушливого периода, 2 октября 2022 г. (рис. 1). Все колодцы вскрывают аллювиальные отложения, представленные глинами, песками и гравием, используются для питьевого водоснабжения (A1–A5) или использовались ранее (B1–B5).

В пробах A1–A5 в лаборатории окружающей среды Джаса Тирта 1 в г. Маланг, Индонезия, Восточная Ява (the Environmental Laboratory, Jasa Tirta I, Malang), определены мутность (нефелометрия), содержания  $\text{Cl}^-$  (аргентометрия),  $\text{Na}^+$  (атомно-абсорбционная спектрометрия с пламенной атомизацией) и  $\text{SO}_4^{2-}$  (турбидиметрический метод), в полевых условиях измерены температура воды и pH (потенциометрический метод) [10].

Анализ проб воды B1–B5 выполнен в гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета (ТПУ), где было проведено определение значений pH (потенциометрический метод), удельной электропроводности EC (кондуктометрический), перманганатной окисляемости (ПО), содержаний  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$  (титриметрический),  $\text{SO}_4^{2-}$  (турбидиметрический),  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , фосфатов, Fe (фотоколориметрический),  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  (пламенно-эмиссионно спектрометрический), более 30 микроэлементов (масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-

спектрометра NexION 300D), углерод органический, неорганический, общий и азот общий (высокотемпературное каталитическое окисление).

Анализ результатов рассматриваемого исследования включал расчёт:

- 1) коэффициентов корреляции  $r$  и погрешностей их определения  $\delta_r$  по формуле (1), выявление регрессионных зависимостей при уровне значимости 5 % и условии (2):

$$\delta_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}} \cdot \sqrt{1 + \frac{11 \cdot r^2}{2 \cdot N} + \frac{75 \cdot r^2 - 13}{2 \cdot N^2}}, \quad (1)$$

$$R^2 > 0,36; \frac{|r|}{\delta_r} \geq 2; \frac{|k_r|}{\delta_k} \geq 2, \quad (2)$$

где  $N$  – объем выборки;  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения;  $k_r$  и  $\delta_k$  – коэффициент регрессии и погрешность его определения [14, 15]; расчёты выполнены в среде MS Excel;

- 2) показателя аддитивного воздействия  $K_f$  (3) токсичных веществ 1, 2 классов опасности согласно требованиям, предъявляемым к качеству вод хозяйственно-питьевого назначения в Российской Федерации [16], и суммарного показателя отклонения химического состава исследуемых грунтовых вод  $K_c$  (4) по сравнению со средними значениями для подземных вод зоны гипергенеза  $C_{a(gsz)}$ , грунтовых вод тропических лесов  $C_{a(gtf)}$  и сухих саванн  $C_{a(gds)}$  согласно [17]:

$$K_f = \sum_{i=1-2} \frac{C_i}{C_{dni}}, \quad (3)$$

$$K_c(j) = \sum_{C_i \geq 2 \cdot C_{a(i,j)}} \frac{C_i}{C_{a(i,j)}} - (N_* - 1), \quad (4)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го вещества;  $C_{dni}$  – предельно-допустимая концентрация  $i$ -го вещества 1 или 2 классов опасности согласно [16];  $C_{a(i,j)}$  – среднее содержание  $i$ -го вещества в  $j$ -м водном объекте (подземных водах мира в пределах зоны гипергенеза, в грунтовых водах тропических лесов и сухих саванн) согласно [18];  $N_*$  – количество случаев, когда  $C_i \geq 2 \cdot C_{a(i,j)}$ ;

- 3) индексов насыщения  $SI$  грунтовых вод относительно ряда минералов (5) методом констант по методике, изложенной в [19]:

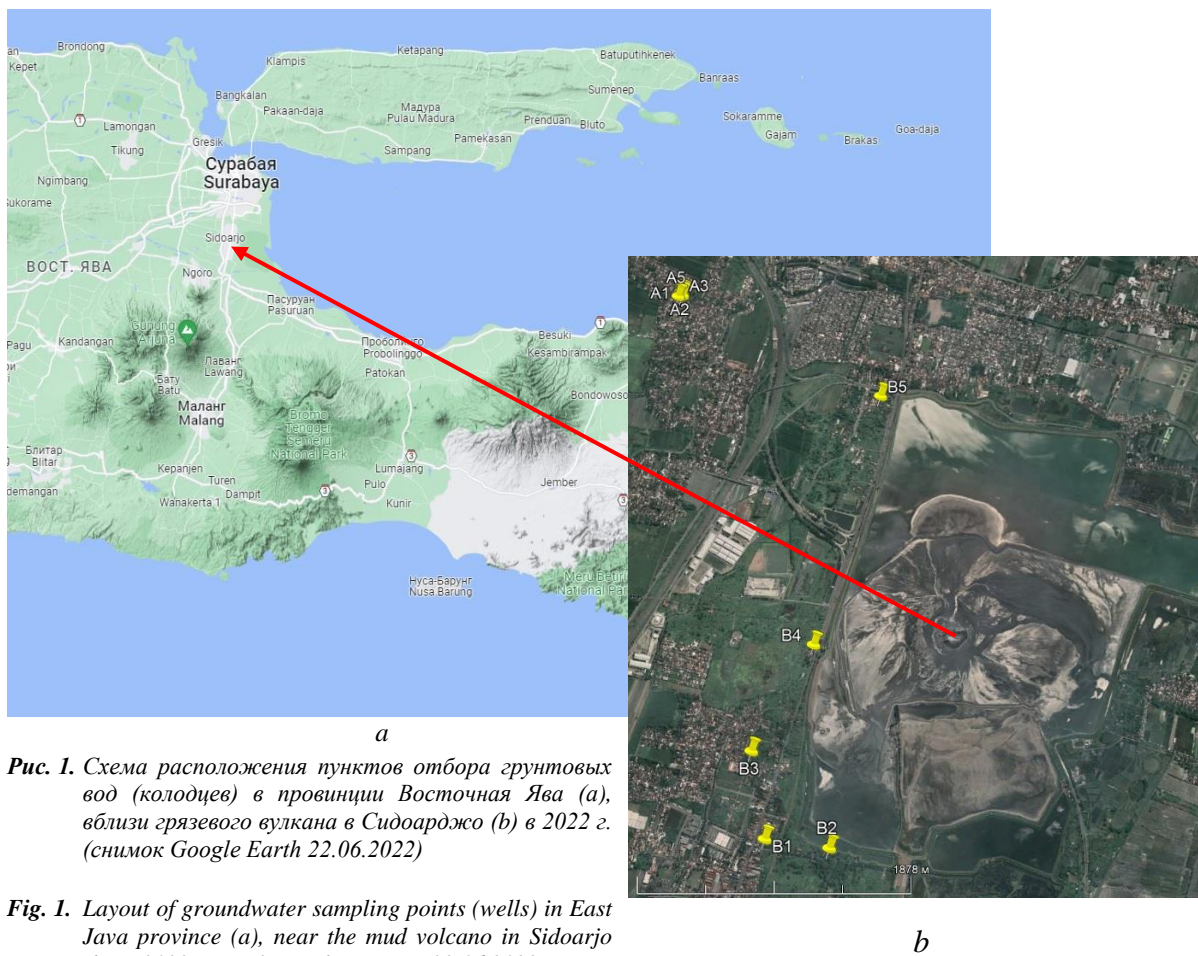
$$SI = \lg PA - \lg K_{neq}, \quad (5)$$

где  $K_{neq}$  – константа неустойчивости;  $PA$  – произведение активностей взаимодействующих веществ; кроме ряда минералов.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Грунтовые воды в округе Сидоарджо по минерализации (согласно [20–22]) характеризуются в основном как пресные с повышенной минерализацией (табл. 1, 2). К солоноватым относятся только воды в пункте B5, расположенном по направлению грязевого потока (рис. 1, б). По химическому составу грунтовые воды в пунктах B1, B2, B3 гидрокарбонатные кальциевые, первого и второго типов по О.А. Алекину [20], в пунктах B4 и B5 – хлоридные натриевые (табл. 2), причем в пункте B5 – третьего типа, что обычно соответствует условиям формирования химического со-

става морских вод [21]. По величине рН (согласно [23]) воды в четырёх случаях из десяти слабощелочные (7,5–8,5), еще в четырёх – нейтральные (6,5–7,5), в двух – слабокислые (5,0–6,5).



**Рис. 1.** Схема расположения пунктов отбора грунтовых вод (колодцев) в провинции Восточная Ява (а), вблизи грязевого вулкана в Сидоарджо (б) в 2022 г. (снимок Google Earth 22.06.2022)

**Fig. 1.** Layout of groundwater sampling points (wells) in East Java province (a), near the mud volcano in Sidoarjo (b) in 2022 (Google Earth image at 22.06.2022)

**Таблица 1.** Физико-химические и химические показатели грунтовых вод в поселении Кеденсари в районе Тангулангин округа Сидоарджо в конце января – начале февраля 2022 г. [10]

**Table 1.** Physicochemical and chemical indicators of groundwater in the Kedensari village, Tanggulangin, Sidoarjo from late January to early February 2022 [10]

Показатель Indicator	Ед. изм. Units	Пункты отбора проб (рис. 1) Sampling points (Fig. 1)				
		A1	A2	A3	A4	A5
Дата отбора/Date of sampling	–	11.01.22			01.02.22	
Широта/Latitude, $\varphi$	° (южной широты)/south	–7,505				
Долгота/Longitude, $\lambda$	°	112,693	112,693	112,693	112,693	112,692
Температура воздуха/Air temperature, $T_a$	°C	28,0	28,8	28,6	30,0	29,0
Температура воды/Water temperature, $T_w$	°C	26,7	28,5	28,3	29,2	28,7
Мутность/Turbidity, SS	NTU	1,0	1,1	0,9	0,8	1,5
рН	–	7,76	7,53	6,69	8,20	7,82
Сумма главных ионов/Sum of main ions, $\Sigma_{mi}$ *	мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>	561	551	553	560	533
Na <sup>+</sup>	То же/The same	1,7	1,4	1,6	29,7	17,4
Cl <sup>-</sup>	–/–	62,9	56,1	57,5	62,5	42,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	–/–	32,6	26,3	25,2	26,6	17,0

Примечание: \*значения суммы главных ионов ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ) вычислены по зависимости, полученной для проб B1–B5:  $\Sigma_{mi} = (476,23 \pm 28,69) + (1,34 \pm 0,04) \cdot [Cl^-]$ ;  $R^2 = 0,99$ .

Note: \*the values of the sum of the main ions ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ) are calculated from the dependence obtained for samples B1–B5:  $\Sigma_{mi} = (476,23 \pm 28,69) + (1,34 \pm 0,04) \cdot [Cl^-]$ ;  $R^2 = 0,99$ .

В пространственном отношении максимальные концентрации макрокомпонентов отмечены вблизи нарушенных грязевыми потоками земель, в их север-

ной-северо-западной части; наиболее высокие содержания органических веществ и очень высокие концентрации  $NO_2^-$  – к юго-западу от грязевого вулкана.

Корреляционный анализ проводился для значений рН, содержания  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и позволил выявить значимые связи между первыми двумя показателями и расстоянием  $L$  от центра Луси (коэффициенты корреляции:  $r[L; \text{pH}] = 0,81 \pm 0,14$ ;  $r[L; \text{Na}^+] = 0,56 \pm 0,25$ ). Статистиче-

ски значимая регрессионная зависимость выявлена только для рН:

$$\text{pH} = (5,56 \pm 0,10) + (0,62 \pm 0,16) \cdot L;$$

$$R^2 = 0,66; L \text{ в км.}$$

Таблица 2. Химический состав грунтовых вод в округе Сидоарджо по состоянию на 2 октября 2022 г.

Table 2. Chemical composition of groundwater in Sidoarjo, 2 October 2022

Показатель Indicator	Ед. изм. Units	Пункты отбора проб (рис. 1) Sampling points (Fig. 1)					$C_{a(oc)}$	Подземные воды Groundwaters [18]			$C_{dn}$ [16]
		B1	B2	B3	B4	B5		$C_{a(gsz)}$	$C_{a(gtf)}$	$C_{a(gds)}$	
$\varphi$	°	-7,540	-7,541	-7,535	-7,528	-7,512	–	–	–	–	–
$\lambda$	°	112,70 0	112,704	112,69 9	112,703	112,706	–	–	–	–	–
$T_a$	°C	29,3	28,9	30,2	30,7	30,6	–	–	–	–	–
$T_w$	°C	28,0	27,6	28,5	29,2	29,3	–	–	–	–	–
$EC$	мкС/см µS/cm	591	584	455	1229	3160	–	–	–	–	–
pH	–	6,52	6,63	6,59	6,47	6,39	8,20 <sup>a</sup>	6,90	6,00	7,20	6–9
$\text{CO}_2$	мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	12,5	8,8	7,0	8,8	12,3	–	26,6	97,0	–	–
$PO$	То же The same	3,8	5,6	0,9	3,0	5,0	–	–	–	–	5(c)/7(nc)
$C_{sum}$	–/–	86,4	72,7	65,2	85,1	46,6	–	–	–	–	–
$C_{org}$	–/–	13,4	11,7	2,1	13,1	3,9	0,5 <sup>b</sup>	8,3	10,9	4,1	–
$C_{noorg}$	–/–	73,0	61,0	63,1	72,0	42,7	–	–	–	–	–
$\Sigma_{mi}$	–/–	576,2	535,3	441,1	863,0	2579,0	34785,7 <sup>a</sup>	447,6	148,6	286,3	1000(c) 1500(nc)
Классификация воды Water classification [20]	–	$C_{Ca I}$	$C_{Ca II}$	$C_{Ca I}$	$Cl_{Na I}$	$Cl_{Na III}$	$Cl_{Na III}$	$C_{Na II}$	$C_{Ca I}$	$C_{Mg I}$	–
$\text{Ca}^{2+}$	–/–	68,0	68,0	57,6	70,4	238,0	408,3 <sup>a</sup>	39,2	16,1	28,1	–
$\text{Mg}^{2+}$	–/–	21,0	17,3	22,0	22,4	73,0	1283,5 <sup>a</sup>	18,2	8,2	19,1	50
$\text{Na}^+$	–/–	50,0	61,0	32,0	192,0	412,0	10674,1 <sup>a</sup>	67,6	8,9	17,8	200
$\text{K}^+$	–/–	27,0	7,2	8,2	8,2	29,0	395,8 <sup>a</sup>	5,2	2,7	1,7	–
$\text{HCO}_3^-$	–/–	356	290	288	344	220	141 <sup>a</sup>	187	103	194	–
$\text{SO}_4^{2-}$	–/–	29,0	26,0	14,0	18,0	35,0	2689,9 <sup>a</sup>	70,7	3,7	15,0	500
$\text{Cl}^-$	–/–	25,2	65,8	19,3	208,0	1572,0	19192,9 <sup>a</sup>	59,7	6,0	10,6	350
$P$	–/–	2,03	0,57	0,92	1,39	0,78	0,088 <sup>b</sup>	0,06	–	–	1,37*
$\text{NO}_3^-$	–/–	3,40	4,00	0,88	8,90	8,70	–	2,40	1,30	1,60	45,00
$\text{NO}_2^-$	–/–	7,70	5,30	0,36	1,73	0,70	–	0,19	–	0,09	3,00
$\text{NH}_4^+$	–/–	0,14	0,29	0,18	0,64	0,09	–	0,59	0,13	0,07	1,50
$N_{sum}$	–/–	3,32	2,57	<0,50	2,88	2,47	–	–	–	–	–
$Si$	–/–	13,67	9,60	13,82	13,44	8,24	2,90 <sup>b</sup>	8,37	8,23	14,77	20
$Li$	мкг/дм <sup>3</sup> µg/dm <sup>3</sup>	0,28	1,61	0,31	0,48	0,94	170 <sup>b</sup>	13,00	–	2,70	30
$B$	То же The same	93	158	68	119	1776	4440 <sup>a</sup>	78	–	–	500
$Al$	–/–	0,93	11,21	3,47	2,18	40,68	1,00 <sup>b</sup>	226,00	369,00	32,20	200
$Sc$	–/–	1,91	1,31	1,61	2,03	1,20	0,04 <sup>c</sup>	0,07	–	–	–
$Ti$	–/–	2,29	1,88	1,37	1,92	4,26	1,00 <sup>b</sup>	17,40	3,60	3,20	–
$V$	–/–	1,01	1,12	7,09	1,63	23,91	1,90 <sup>b</sup>	1,34	–	0,50	100
$Mn$	–/–	1476	714	291	4112	619	2 <sup>c</sup>	55	33	53	100
$Fe$	–/–	74	417	87	1482	200	10 <sup>c</sup>	481	396	362	300
$Cr$	–/–	2,04	1,82	1,99	2,47	1,61	0,20 <sup>b</sup>	2,70	–	3,80	–
$Co$	–/–	0,14	0,17	0,07	0,15	0,26	0,39 <sup>b</sup>	0,39	1,90	1,00	100
$Ni$	–/–	0,87	0,58	<0,03	0,10	2,01	6,60 <sup>b</sup>	3,38	4,00	7,60	20
$Cu$	–/–	0,13	1,17	0,53	2,04	2,79	0,90 <sup>b</sup>	5,38	3,40	4,50	1000
$Zn$	–/–	7,99	64,67	0,87	1,54	7,54	5,00 <sup>b</sup>	38,40	36,50	–	5000
$Ga$	–/–	0,04	0,03	0,01	0,14	0,03	–	–	–	–	–
$Ge$	–/–	0,32	0,03	<0,01	0,10	0,01	–	–	–	–	–
$As$	–/–	0,17	0,59	6,36	16,23	3,11	2,60 <sup>b</sup>	1,46	–	–	10
$Se$	–/–	0,17	0,86	0,52	2,24	14,31	0,09 <sup>b</sup>	0,72	–	0,13	10
$Br$	–/–	50	151	55	757	3922	67300 <sup>a</sup>	103	–	–	200
$Rb$	–/–	21	12	8	11	21	120 <sup>b</sup>	2	–	2	–
$Sr$	–/–	482	405	309	554	1263	8100 <sup>b</sup>	183	27	30	7000
$Y$	–/–	0,004	0,030	0,008	0,073	0,062	–	–	–	–	–
$Zr$	–/–	0,005	0,041	0,002	0,035	0,039	0,026 <sup>b</sup>	1,200	–	–	–
$Nb$	–/–	<0,003	0,009	0,001	0,010	<0,003	0,015 <sup>b</sup>	0,450	–	–	10,00

Показатель Indicator	Ед. изм. Units	Пункты отбора проб (рис. 1) Sampling points (Fig. 1)					$C_{a(oc)}$	Подземные воды Groundwaters [18]			$C_{dn}$ [16]
		B1	B2	B3	B4	B5		$C_{a(gsz)}$	$C_{a(gff)}$	$C_{a(gds)}$	
Mo	--/	3,16	0,87	3,20	2,99	3,85	10,00 <sup>b</sup>	1,75	–	1,40	70,00
Ru	--/	0,018	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	–	–	–	–	–
Rh	--/	0,006	0,006	0,007	0,014	0,023	–	–	–	–	–
Pd	--/	0,007	0,010	0,003	0,008	0,021	–	–	–	–	–
Ag	--/	0,009	<0,003	<0,003	<0,003	0,004	0,280 <sup>b</sup>	0,260	–	–	50,0
Cd	--/	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,071	0,110 <sup>b</sup>	0,240	–	–	1,00
Sn	--/	<0,003	0,016	<0,003	0,076	0,261	0,810 <sup>b</sup>	0,390	–	–	2000,00
Sb	--/	1,209	0,125	0,123	0,004	0,485	0,330 <sup>b</sup>	0,680	–	–	5,00
I	--/	25	69	66	96	3143	64 <sup>b</sup>	8	–	–	125,00
Cs	--/	0,026	0,092	<0,001	0,044	0,023	0,300 <sup>b</sup>	0,260	–	–	–
Ba	--/	183	101	43	185	238	21 <sup>b</sup>	18	13	9	700
La	--/	0,002	0,023	0,005	0,006	0,055	0,003 <sup>b</sup>	0,670	–	–	–
Ce	--/	<0,001	0,036	0,007	0,010	0,093	–	–	–	–	–
Pr	--/	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	0,012	–	–	–	–	–
Nd	--/	<0,001	0,013	<0,001	<0,001	0,024	–	–	–	–	–
Sm	--/	<0,001	0,017	<0,001	<0,001	0,029	–	–	–	–	–
Eu	--/	0,022	0,020	0,006	0,031	0,037	–	–	–	–	–
Tb	--/	<0,001	0,002	<0,001	0,001	<0,001	–	–	–	–	–
Dy	--/	<0,001	0,005	<0,001	0,004	0,012	–	–	–	–	–
Ho	--/	<0,001	0,002	<0,001	0,003	0,001	–	–	–	–	–
Er	--/	<0,001	0,002	<0,001	0,002	0,007	–	–	–	–	–
Tm	--/	<0,001	0,001	0,001	<0,001	0,001	–	–	–	–	–
Yb	--/	0,003	<0,001	<0,001	0,003	0,004	–	–	–	–	–
Lu	--/	0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001	–	–	–	–	–
Hf	--/	0,003	0,011	0,003	0,008	<0,001	–	–	–	–	–
W	--/	0,22	0,05	0,03	0,11	<0,01	–	–	–	–	50
Re	--/	<0,001	0,002	0,002	<0,001	<0,001	–	–	–	–	–
Ir	--/	<0,003	0,002	<0,003	0,003	<0,003	–	–	–	–	–
Au	--/	<0,003	<0,003	<0,003	0,024	0,042	0,011 <sup>b</sup>	0,005	0,001	–	–
Hg	--/	0,71	1,00	0,51	1,31	26,39	0,15 <sup>b</sup>	0,04	–	–	0,5
Tl	--/	0,001	0,002	0,007	0,001	0,038	–	–	–	–	0,1
Pb	--/	0,02	1,01	0,05	0,11	0,32	0,03 <sup>b</sup>	2,65	2,10	2,50	10
Th	--/	0,003	0,009	0,011	0,008	0,003	0,0004 <sup>b</sup>	0,240	–	–	–
U	--/	0,005	0,019	0,209	0,006	0,301	3,300 <sup>b</sup>	1,310	–	1,240	15
$K_f$	–	6,2	6,8	3,8	11,9	106,8	–	–	–	–	–
$K_{c(gsz)}$	–	170,6	109,6	73,1	223,3	1252,6	–	–	–	–	–
$K_{c(gff)}$	–	130,4	91,3	49,1	275,6	492,6	–	–	–	–	–
$K_{c(gds)}$	–	194,6	131,5	54,8	218,6	468,2	–	–	–	–	–

Примечание: средние содержания в морских водах  $C_{a(oc)}$  по: а) [24]; б) [25]; приводятся по [18]; в) [26];  $K_f$  – сумма соотношений фактических и предельно допустимых концентраций веществ  $C_{dn}$  (для вод хозяйственно-питьевого назначения) первого и второго класса опасности [16] по формуле (3); с и nc – нормативы для централизованного и нецентрализованного питьевого водоснабжения;  $K_{c(gsz)}$ ,  $K_{c(gff)}$ ,  $K_{c(gds)}$  – показатели отклонения от средних значений для подземных вод зоны гипергенеза  $C_{a(gsz)}$ , тропических лесов  $C_{a(gff)}$  и сухих саванн  $C_{a(gds)}$  по формуле (4); EC – удельная электропроводность; PO – перманганатная окисляемость;  $C_{org}$ ,  $C_{norg}$ ,  $C_{sum}$  – углерод органических, неорганических соединений и суммарно;  $N_{sum}$  – азот суммарно; классификация воды по [20]: C или Cl – класс воды по преобладающему аниону (гидрокарбонатные или хлоридные); Ca, Na, Mg – группа по преобладающему катиону (кальциевые, натриевые, магниевые); I, II, III – тип воды по соотношению ионов и условиям формирования химического состава воды; «–» – отсутствие данных; остальные обозначения приведены в табл. 1.

Note: average concentrations in sea waters according to: a) [24]; b) [25]; cited after [18]; c) [26];  $K_f$  is the sum of the ratios of actual and maximum allowable concentrations of substances  $C_{dn}$  (for drinking water) of the first and second hazard classes [16] according to formula (3); c and nc are the standards for centralized and non-centralized drinking water supply;  $K_{c(oc)}$ ,  $K_{c(gsz)}$ ,  $K_{c(gff)}$ ,  $K_{c(gds)}$  are the indicators of deviation from the average values for the World Ocean  $C_{a(oc)}$ , groundwater of the supergene zone  $C_{a(gsz)}$ , tropical forests  $C_{a(gff)}$  and dry savanna  $C_{a(gds)}$  according to formula (4); EC is the electrical conductivity; PO is the permanganate oxidizability;  $C_{org}$ ,  $C_{norg}$ ,  $C_{sum}$  are the carbon of organic, inorganic compounds and in total;  $N_{sum}$  is the total nitrogen; water classification according to [20]: C or Cl is the class of water according to the predominant anion (carbonate or chloride); Ca, Na, Mg is the group according to the predominant cation (calcium, sodium, magnesium); I, II, III is the type of water according to the ratio of ions and the conditions for the formation of the chemical composition of water; «–» – no data; other designations are given in Table 1.

По соотношению фактических и предельно допустимых (в Российской Федерации) концентраций по показателю  $K_f$  в октября 2022 г. наилучшее качество воды в пункте В3, наихудшее – в В5, где отмечены очень высокие концентрации I, Вг и Нг (табл. 2, рис. 1). Подобная ситуация наблюдается и при сравнении по-

казателей исследуемых вод со средними показателями для подземных вод зоны гипергенеза, а также тропических лесов и засушливых саванн, условия в которых близки к условиям Восточной Явы (согласно [17], «сильный» уровень загрязнения вод в пунктах В2 и В3, в остальных пунктах «максимальный»).

С учетом этого можно сделать предварительный вывод, во-первых, о значительном хозяйственно-бытовом загрязнении грунтовых вод к юго-западу от грязевого вулкана Луси, связанном, видимо, как с поступлением в водоносный горизонт большого количества органических веществ, так и с неблагоприятными условиями их окисления (судя по содержанию  $C_{org}$  и  $NO_2^-$ ). Во-вторых, влияние грязевого вулкана в целом ограничено рекой Кетапанг в северной части нарушенного участка земель и рекой Поронг (рукав реки Брантас) на юге и усиливается в направлении преобладающих уклонов земной поверхности с юга-юго-запада на север-северо-восток. В результате аварий на ограждающей дамбе и гидравлической связи поверхностных и подземных вод возможно загрязнение на прилегающих территориях (особенно пункт В4 к западу от Луси), но максимальное загрязнение следует ожидать к северу (пункт В5) и, видимо, к западу от нарушенных земель. В-третьих, район расположения пунктов А1–А5 в первом приближении можно рассматривать как условный природно-антропогенный геохимический фон при изучении влияния грязевого вулкана на содержание главных ионов, особенно хлоридов. В-четвертых, хлориды в целом в наименьшей степени (по сравнению с прочими показателями) выводятся из водной среды в результате сорбционных процессов или процессов образования и оседания малорастворимых соединений.

На основе указанных выше предположений и с использованием уравнения одномерной гидродисперсии (6) была выполнена попытка восстановления распространения ионов  $Cl^-$  с подповерхностным стоком от центра Луси в сторону реки Кетапанг:

$$k_s \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_n \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (6)$$

где  $C$  – концентрация ( $Cl^-$ ),  $mg/dm^3$ ;  $t$  и  $x$  – координаты времени (с) и расстояния (м);  $u$  – действительная скорость движения ( $u = \frac{v}{n_a}$ ,  $v$  – скорость фильтрации, м/с;  $n_a$  – активная пористость,  $m^3/m^3$ ), м/с;  $k_s$  – фактор сорбционной задержки;  $D_n$  – коэффициент поровой дисперсии ( $D_n = \frac{D_m + \beta \cdot v}{n_a}$ ,  $D_m$  – коэффициент молекулярной диффузии,  $m^2/c$ ;  $\beta$  – параметр дисперсии, м),  $m^2/c$  [27]. Приближённое аналитическое решение (6) имеет вид [27, 28]:

$$C_{x,t} \approx C_b + \frac{(C_0 - C_b)}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x - u \cdot t / k_s}{4 \cdot \sqrt{D_n \cdot t / k_s}} \right), \quad (7)$$

где  $C_{x,t}$  – концентрация вещества в момент  $t$  на удалении  $x$  от центра Луси (на север);  $C_0$  и  $C_b$  – условный фон и ориентировочное содержание  $Cl^-$  в центре грязевого вулкана;  $\operatorname{erfc}$  – функция ошибок.

Фооновая концентрация  $C_b$  оценена с учётом требований [29, 30] по данным опробования в пунктах А1–А5 как верхняя граница определения среднего геометрического при уровне значимости 5 % ( $C_b = \exp \left( C_{A(\ln C)} + \frac{k_{st,5\%} \cdot \sigma_{\ln C}}{N} \right)$ ,  $C_{A(\ln C)}$  и  $\sigma_{\ln C}$  – среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения натурального логарифма концентрации;  $k_{st,5\%}$  – ордината распределения Стьюдента при уровне зна-

чимости 5 % ( $k_{st,5\%} = 2,13$ );  $C_b = 65,0 \text{ mg/dm}^3$ ). Значения  $D_m$  для  $Cl^-$  приняты по зависимости от температуры воды, полученной по приведенным в [31] данным ( $D_m = 1,00 \cdot 10^{-9} + T_w \cdot 4,04 \cdot 10^{-11}$ ,  $D_m = 2,18 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/c$  при температуре воды  $T_w = 29,3^\circ C$ ), значения активной пористости  $n_a$  (0,492) – по данным Клэппа и Хорнберга, приведенным в [32, табл. 3.2.1] для пылеватой глины. Значения  $C_0$ ,  $k_s$ ,  $v$ ,  $\beta$  определены в среде MS Excel подбором методом общего понижающего градиента с целевой функцией в виде минимума функции  $Kr = 100 \cdot \frac{|C_{obs} - C_{sim}|}{C_{obs}}$ , где  $C_{obs}$  и  $C_{sim}$  – измеренные и расчетные значения характеристики ( $C_0 = 1572,0 \text{ mg/dm}^3$ ;  $k_s = 0,030 \text{ м}$ ;  $v = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ ;  $\beta = 1,009$ ;  $Kr = 9,80 \cdot 10^{-5} \%$ ).

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что грязевые воды в целом характеризуются как солоноватые (судя по соотношению концентраций  $Cl^-$  и суммы главных ионов, табл. 1, 2), а распространение грязевых вод от центра Луси до реки Кетапанг завершилось примерно в течение первых шести лет (рис. 2). Следовательно, даже при прекращении активности грязевого вулкана её последствия на нарушенном участке и прилегающих к нему территориях будут наблюдаться многие годы.

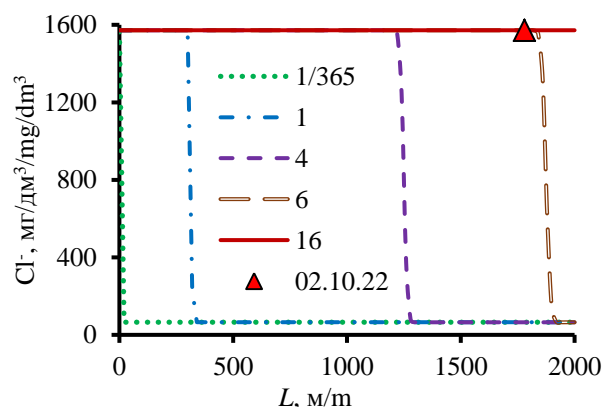


Рис. 2. Измеренные (02.10.2022) и расчетные концентрации  $Cl^-$  на различном удалении  $L$  от центра грязевого вулкана в Сидоардже 30.05.2006 (1/365), через 1, 4, 6 и 16 лет после начала первого извержения

Fig. 2. Measured (October 2, 2022) and calculated  $Cl^-$  concentrations at different distances  $L$  from the center of the mud volcano in Sidoarjo on May 30, 2006 (1/365), 1, 4, 6, and 16 years after the start of the first eruption

Содержания ряда других химических элементов по мере удаления от грязевого вулкана снижаются более существенно (табл. 2). В той или иной мере это может быть связано с осаждением малорастворимых веществ (например, карбонатов кальция и магния при наличии растворенного углекислого газа, кварца), относительно которых воды потенциально перенасыщены во всех пунктах в октябре 2022 г. При этом следует отметить, что грязевые воды остаются недонасыщенными относительно многих минералов (табл. 3), что объясняется, согласно [18, 33], функционированием карбонатного барьера.



**Таблица 3.** Индексы насыщения грунтовых вод в округе Сидоарджо 2 октября 2022 г.

**Table 3.** Groundwater saturation indices in Sidoarjo district, October 2, 2022

Реакция Reaction	Пункты отбора проб (рис. 1) Sampling points (Fig. 1)				
	B1	B2	B3	B4	B5
$\text{CaCO}_3(\text{calcite}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2 \cdot \text{HCO}_3^-$	0,34	0,33	0,31	0,43	0,04
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{dolomite}) + 2 \cdot \text{CO}_2 + 2 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4 \cdot \text{HCO}_3^-$	1,21	1,09	1,25	1,40	0,71
$\text{SiO}_2(\text{quartz}) + 2 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	0,76	0,60	0,76	0,75	0,54
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{anorthite}) + 2 \cdot \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{kaolinite}) + \text{Ca}^{2+}$	-20,82	-20,58	-20,41	-20,37	-21,44
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{anorthite}) + 2 \cdot \text{H}^+ + 6 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{gibbsite}) + 2 \cdot \text{H}_4\text{SiO}_4^0 + \text{Ca}^{2+}$	-6,02	-6,10	-5,97	-6,15	-6,47
$2 \cdot \text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{albite}) + 11 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2 \cdot \text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{kaolinite}) + 2 \cdot \text{Na}^+ + 2 \cdot \text{HCO}_3^- + 4 \cdot \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-6,82	-7,13	-6,87	-5,44	-6,47
$3 \cdot \text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{orthoclase}) + 2 \cdot \text{H}^+ + 12 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2(\text{muscovite}) + 2 \cdot \text{K}^+ + 6 \cdot \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-19,82	-21,67	-20,68	-21,02	-21,39
$2 \cdot \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2(\text{muscovite}) + 2 \cdot \text{H}^+ + 3 \cdot \text{H}_2\text{O} = 3 \cdot \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{kaolinite}) + 2 \cdot \text{K}^+$	0,05	-0,88	-0,84	-1,11	-0,23

### Заключение

Получена предварительная оценка эколого-геохимического состояния грунтовых вод в районе грязевого вулкана в Сидоарджо по результатам обследования в 2022 г. Грунтовые воды оцениваются как: 1) пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые, загрязненные нитритами и органическими веществами на участках вне основного направления уклона земной поверхности и движения водных масс с запада-юго-запада на восток-северо-восток, ограниченно пригодные для хозяйственно-питьевого использования (использование при условии водоподготовки); 2) солоноватые, хлоридные натриевые, с высокими содержаниями Hg, I, Br, B, не пригодные для хозяйственно-питьевого использова-

ния. Повышенные концентрации  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , I, Br, B, предположительно, свидетельствуют об участии в формировании состава флюидов грязевого вулкана морских вод. Генезис Hg требует более детального изучения и, возможно, связан с локальными особенностями участка размещения пункта B5 (табл. 2). В целом наиболее объективным и пригодным для мониторинга показателем влияния на состояние именно грязевого вулкана является содержание  $\text{Cl}^-$ .

Для получения более достоверной оценки влияния грязевого вулкана в Сидоарджо и долгосрочного прогноза последствий этого влияния целесообразно дальнейшее исследование химического состава грунтовых вод к востоку от Луси, а также изучение состояния вод и донных отложений рек Поронг и Кетапанг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригула Т.Ю., Ерёмин В.А., Спрыгин А.Н. Физическая география материков и океанов. – М.: ВЛАДОС, 2004. – 685 с.
2. Triggering of the Lusi mud eruption: earthquake versus drilling initiation / M. Tingay, O. Heidbach, R. Davies, R. Swarbrick // *Geology*. – 2008. – V. 36. – № 8. – P. 639–643. DOI: 10.1130/G24697A.1.
3. Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia / A. Mazzini, A. Nermoen, M. Krotkiewski, Y. Podladchikov, S. Planke, H. Svensen // *Marine and Petroleum Geology*. – 2009. – V. 26. – P. 1751–1765. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.03.001.
4. The LUSI mud volcano triggering controversy: Was it caused by drilling? / N. Sawolo, E. Sutriyono, B.P. Istadi, A.B. Darmoyo // *Marine and Petroleum Geology*. – 2009. – V. 26. – P. 1766–1784. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.04.002.
5. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Грязе-вулканическая катастрофа в Индонезии // *Бурение и нефть*. – 2017. – № 11. – С. 18–27.
6. The utilization of lapindo mud waste for aluminium sulfate production / L.I. Utami, T.S. Rizaldi, K.N. Wahyusi, R.E. Nugraha // *International Journal of Eco-Innovation in Science and Engineering* – 2020. – V. 02 (2). – P. 14–19. DOI: 10.4186/ijeise.upnjatim.ac.id/E-ISSN: 2721-8775.
7. Monitoring seawater quality in the Kali Porong estuary as an area for Lapindo mud disposal leveraging Google Earth Engine / F. Bioresita, M.H. Ummah, M. Wulansari, N.A. Putri // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 936 012011. – 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/936/1/012011.
8. Impact of anthropogenic activity and lusi-mud volcano on fish biodiversity at the Brantas Delta, Indonesia / Y. Risjani, D.R. Santoso, J. Couteau, A. Hermawati, I. Widowati, C. Minier // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 493012007. – 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/493/1/012007.
9. Saputro R.A.A., Suhardjono Juwono P.T. Analysis of carrying capacity of the Porong river caused by Sidoarjo mud disposal //

- Civil and Environmental Science Journal. – 2021. – V. 4 (2). – P. 192–201. DOI: 10.21776/ub.civense.2021.00402.9.
10. Adiyaksa I.P., Sulianto A.A., Savichev O.G. Water quality assessment and risk analysis calculation of chloride and sodium exposure of well water in Tanggulangin, Sidoarjo // *Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem*. – 2022. – V. 10 (2). – P. 92–100. DOI: 10.21776/ub.jkptb.2022.010.02.01.
11. Aquastat. Country Profile – Indonesia. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). – Rome, Italy, 2011. – 16 p. URL: <https://www.fao.org/3/ca0393en/CA0393EN.pdf> (дата обращения 03.12.2022).
12. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
13. Manual on stream gauging. V. I. Fieldwork. WMO. № 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
14. Рождественский А.В., Чеботарёв А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.
15. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
16. СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утверждены Постановлением от 28 января 2021 г. № 2. Зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 г. № 62296. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации, 2021. – 1025 с.
17. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
18. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
19. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // *Геоэкология*. – 2003. – № 2. – С. 108–119.

20. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
21. Справочник по гидрохимии / под ред. А.В. Никанорова. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 391 с.
22. ГОСТ 27065-86. Качество вод. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 9 с.
23. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / под ред. Т.В. Гусевой. – М.: ФОРУМ: Инфра-М, 2007. – 192 с.
24. Иваненков В.Н. Основной солевой состав вод океана // Океанология. Химия океана. В 2-х т. Т. 1. Химия вод океана / отв. ред. О.К. Бордовский, В.Н. Иваненков. – М.: Наука, 1979. – С. 43–48.
25. Turekian K.K. The ocean, streams and atmosphere // Handbook of Geochemistry / ed. by K.Y. Wedepohl. – Berlin; New York: Springer, 1969. – V. 1. – P. 297–323.
26. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. – М.: Наука, 1967. – 216 с.
27. Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. – СПб: Наука, 2020. – 559 с.
28. Benedini M., Tsakiris G. Water quality modelling for rivers and streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
29. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 228 с.
30. РД 52.24.622-2019. Порядок проведения расчетов условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. – Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2019. – 85 с.
31. Lerman A. Geochemical processes water and sediment environments. – New York: John Wesley&sons, 1979. – 481 p.
32. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
33. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред. Н.П. Лавёров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.

*Поступила: 08.12.2022 г.*

*Прошла рецензирование: 22.12.2022 г.*

#### **Информация об авторах**

**Адьякса И.П.**, магистрант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

UDC 556.388

## ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CONDITION OF GROUNDWATER IN THE REGION OF THE MUD VOLCANO IN SIDOARJO (EAST JAVA PROVINCE, INDONESIA)

Ilham Putra Adiyaksa<sup>1</sup>,  
ilhamadiyaksa@gmail.com

Oleg G. Savichev<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Albina A. Khvashchenskaya<sup>1</sup>,  
Garibova@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** Since 2006, the world's largest mud volcano has been happening in the eastern part of the island of Java (Indonesia), the province of East Java, the district of Sidoarjo. The surrounding areas are densely populated, which determines the constant need for high-quality drinking water. The lack of quality water is exacerbated by the influence of a mud volcano.

**The aim** of the research is to assess the ecological and geochemical condition of groundwater in the area adjacent to the world's largest mud volcano in Sidoarjo (Indonesia, East Java province).

**Methods:** methods for determining the chemical composition of groundwater, statistical methods, as well as mathematical modeling.

**Results and conclusions.** The authors have obtained the preliminary assessment of the ecological and geochemical state of groundwater in the area of the mud volcano in Sidoarjo based on the results of a survey in January, February and October 2022. The result shows that groundwater in this area is assessed as: 1) freshwater with increased mineralization, bicarbonate calcium in areas outside the main direction of the slope of the earth's surface and the movement of water masses from the west-southwest to the east-northeast, limitedly suitable for domestic and drinking use (water treatment is needed for water use); 2) brackish, sodium chloride, with high contents of Hg, I, Br, B, not suitable for household and drinking use. Elevated concentrations of Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, I, Br, B presumably testify to the participation of marine waters in the formation of the fluid composition of the mud volcano. The genesis of Hg requires more detailed study, and, possibly, is associated with local features. In general, the most objective indicator of the impact on the state of a mud volcano is Cl<sup>-</sup> content. Recommendations are given for further hydrogeochemical studies in Sidoarjo.

### Key words:

mud volcano in Sidoarjo, Indonesia, groundwater, chemical composition, quality.

### REFERENCES

- Pritula T.Yu., Eremina V.A., Spryalin A.N. *Fizicheskaya geografiya materikov i okeanov* [Physical geography of continents and oceans]. Moscow, VLADOS Publ., 2004. 685 p.
- Tingay M., Heidebach O., Davies R., Swarbrick R. Triggering of the Lusi mud eruption: Earthquake versus drilling initiation. *Geology*, 2008, vol. 36, no 8, pp. 639–643. DOI: 10.1130/G24697A.1.
- Mazzini A., Nermon A., Krotkiewski M., Podladchikov Y., Planke S., Svensen H. Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, vol. 26, pp. 1751–1765. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.03.001.
- Sawolo N., Sutriano E., Istadi B.P., Darmoyo A.B. The LUSI mud volcano triggering controversy: Was it caused by drilling? *Marine and Petroleum Geology*, 2009, vol. 26, pp. 1766–1784. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.04.002.
- Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N. Mud volcanic catastrophe in Indonesia. *Drilling and oil*, 2017, no. 11, pp. 18–27. In Rus.
- Utami L.L., Rizaldi T.S., Wahyuni K.N., Nugraha R.E. The utilization of lapindo mud waste for aluminium sulfate production. *International Journal of Eco-Innovation in Science and Engineering*, 2020, vol. 02 (2), pp. 14–19. DOI: 10.4186/ijeise.upnjatim.ac.id/E-ISSN: 2721-8775.
- Bioresita F., Ummah M.H., Wulansari M., Putri N.A. Monitoring seawater quality in the Kali Porong estuary as an area for Lapindo mud disposal leveraging Google Earth Engine. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 936 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/936/1/012011.
- Risjani Y., Santoso D.R., Couteau J., Hermawati A., Widowati I., Minier C. Impact of anthropogenic activity and lusi-mud volcano on fish biodiversity at the Brantas Delta, Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 493012007, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/493/1/012007.
- Saputro R.A.A., Suhardjono Juwono P.T. Analysis of carrying capacity of the Porong river caused by Sidoarjo mud disposal. *Civil and Environmental Science Journal*, 2021, vol. 4 (2), pp. 192–201. DOI: 10.21776/ub.civense.2021.00402.9.
- Adiyaksa I.P., Sulianto A.A., Savichev O.G. Water quality assessment and risk analysis calculation of chloride and sodium exposure of well water in Tanggulangin, Sidoarjo. *Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 2022, vol. 10 (2), pp. 92–100. DOI: 10.21776/ub.jkptb.2022.010.02.01.
- Aquastat. Country profile – Indonesia. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. Rome, Italy, 2011. 16 p. Available at: <https://www.fao.org/3/ca0393en/CA0393EN.pdf> (accessed 3 December 2022).
- Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2<sup>nd</sup> ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
- Manual on Stream Gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
- Rozhdestvensky A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskie metody v gidrologii* [Statistical methods in hydrology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 424 p.
- SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opreделение osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
- SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya* [Sanitary norms and rules of Russian Federation 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for

- ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Approved by Resolution No. 2 of January 28, 2021. Moscow, Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare. Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation, 2021. 1025 p.
17. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezultatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000 and its results]. Moscow, IMGRE Press, 2002. 92 p.
  18. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
  19. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters. *Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119. In Rus.
  20. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
  21. *Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook of hydrochemistry]. Ed. by A.V. Nikanorov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 391 p.
  22. GOST 27065-86. *Kachestvo vod. Terminy i opredeleniya* [Water quality. Terms and definitions]. Moscow, Standards Publ. House, 2003. 9 p.
  23. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Hydrochemical indicators of the state of the environment]. Ed. by T.V. Guseva. Moscow, FORUM, Infra-M, 2007. 192 p.
  24. Ivanenkov V.N. *Osnovnoy solevoy sostav vod okeana* [The main salt composition of the ocean waters]. *Okeanologiya. Khimiya okeana* [Oceanology. Ocean Chemistry]. In 2 vol. Vol. 1. *Khimiya vod okeana* [Chemistry of ocean waters]. Eds. O.K. Bordovsky, V.N. Ivanenkov. Moscow, Nauka Publ., 1979. pp. 43–48.
  25. Turekian K.K. *The ocean, streams and atmosphere. Handbook of Geochemistry*. Ed. by K.Y. Wedepohl. Berlin, New York, Springer, 1969. Vol. 1, pp. 297–323.
  26. Vinogradov A.P. *Vvedenie v geokhimiya okeana* [Introduction to ocean geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 216 p.
  27. Romanian V.G. *Teoriya i metody izucheniya zagryazneniya podzemnykh vod* [Theory and methods of studying groundwater pollution]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2020. 559 p.
  28. Benedini M., Tsakiris G. *Water quality modelling for rivers and streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
  29. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [The instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 228 p.
  30. RD 52.24.622-2019. *Poryadok provedeniya raschetov usloynykh fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obyektov dlya ustanovleniya normativov dopustimyykh sbrosov stochnykh vod* [The procedure for calculating the conditional background concentrations of chemicals in the water of water bodies to establish standards for permissible wastewater discharges]. Rostov-on-Don, Roshydromet, FGBU «GHI» publ., 2019. 85 p.
  31. Lerman A. *Geochemical processes water and sediment environments*. New York, John Wesley&sons, 1979. 481 p.
  32. Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy* [Modelling of warm and moisture exchange of a land surface with an atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
  33. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.

Received: 8 December 2022.  
Reviewed: 22 December 2022.

#### Information about the authors

**Ilham Putra Adiyaksa**, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Oleg G. Savichev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Albina A. Khvashchevskaya**, Cand. Sc., associate professor, head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 669.02.09

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНЫХ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ (УЧАЛИНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ)

Васильева Анна Андреевна<sup>1</sup>,  
fml0914@mail.ru

Бодуэн Анна Ярославовна<sup>1</sup>,  
Boduен\_aya@pers.spmi.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Горный университет,  
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я лин. В.О., 2.

**Актуальность.** Медно-колчеданные руды России представляют собой основу минерально-сырьевой базы металлургической промышленности страны, в первую очередь обеспечивая медью и цинком, и такими металлами, как Pb, Au, Ag и т. д. На сегодняшний день около 25 % из общего количества балансовых запасов цинка страны находится в составе медно-колчеданных руд, роль основного компонента в которых выполняет медь. Результатом флотационного обогащения медноколчеданных руд является получение некондиционных медных концентратов (содержание Cu ~15–20 %, содержание Zn ≥5 %). Пирометаллургической переработке таких материалов на черновую медь характерны высокие затраты, а также безвозвратные потери ценных компонентов. На сегодняшний день вопросы изучения характеристик исходных материалов и месторождений, разработки технологий переработки медь- и цинксо­дер­жащих материалов, а также анализа существующих и перспективных вариантов переработки являются актуальными и, как результат, способными оказать положительный эффект как с точки зрения комплексности использования сырья, повышения качества получаемых продуктов и степени их извлечения, так и, следовательно, с экономической точки зрения.

**Цель.** Анализ особенностей медных цинксо­дер­жащих руд, в частности руд Учалинского и Верхнеуральского меднорудных районов, обогащаемых на Учалинском горно-обога­ти­тель­ном комбинате, минералогическая оценка концентратов Учалинского горно-обога­ти­тель­ного комбината с последующим выбором перспективных вариантов переработки низкосортных медных концентратов, основанных на гидрометаллургических способах обработки.

**Методы.** Анализ данных об основных типах месторождений меди, характеристике медно-колчеданных руд России, а также более подробных данных о рудах, обогащаемых на горно-обога­ти­тель­ном комбинате, проводился на основе обзора отечественных и зарубежных литературных и информационных источников. Также произведен анализ концентрата и промпродукта Учалинского горно-обога­ти­тель­ного комбината. Благодаря полученной посредством совокупности вышеуказанных методов информации проведена оценка и изложена информация о возможных вариантах усовершенствования технологий переработки исследуемого сырья.

**Результаты.** Благодаря изучению и разработке более комплексных подходов в переработке материалов с низким содержанием полезных компонентов и комплексного сырья, в частности, изученного в данной работе, в дальнейшем станет возможным достижение улучшенных технологических показателей как с экономической, так и с экологической точек зрения. В настоящей работе более подробно будут рассмотрены сырье и продукция, применяемые и получаемые, соответственно, на Учалинском горно-обога­ти­тель­ном комбинате, республика Башкирия.

### Ключевые слова:

медные концентраты, гидрометаллургическое кондиционирование, атмосферное выщелачивание, сульфидное сырье, автоклавное окисление, механоактивация.

### Введение

Одно из важнейших направлений для оптимизации и улучшения показателей производства в сферах освоения рудных месторождений, последующего обогащения добытых руд, а также металлургической переработки полученных концентратов – рациональное использование природных ресурсов, а также ресурсов техногенного происхождения. Стремительное развитие горной промышленности отразилось на истощении балансовых запасов месторождений (богатых по своему содержанию) и, параллельно с этим, на росте объемов техногенного сырья, складываемого на поверхности Земли [1].

Содержание ценных компонентов в рудах, добываемых на месторождениях Южного Урала медно-колчеданного типа, снизилось весьма значительно за последние 50 лет: содержание Cu стало меньше в

~2,5 раза, количество Zn упало приблизительно в 3 раза, а Au и Ag – в 2 и ~1,5 раза, соответственно. При этом доля труднообога­ти­мых руд увеличилась до 40 % (от общего количества применяемого сырья), но при этом уровень сквозного извлечения полезных компонентов сырья сохранился на неизменном уровне: в недрах Земли, а также в процессе переработки остаётся порядка 50 % полезных ископаемых [2].

В настоящий момент на территории России накоплены значительные количества техногенных отходов производств, которые в большинстве своём могут быть рассмотрены в качестве дополнительных ресурсов для переработки и доизвлечения из них полезных компонентов, поскольку зачастую качественные характеристики таких материалов могут быть сопоставимы с показателями перспективных или эксплуатируемых месторождений. Так, в процессе переработки руд медно-колчеданных месторождений на Урале

было получено более 1,5 млрд т техногенного сырья, которое, в свою очередь, представляет интерес как альтернативный источник для дальнейшей переработки с целью получения ряда ценных компонентов, таких как цинк, медь, а также другие цветные, редкие и драгоценные металлы.

Одним из важнейших предприятий по добыче и переработке колчеданных руд является Учалинский горно-обогатительный комбинат (ГОК) – часть крупного промышленного холдинга «Уральская горно-металлургическая компания» (УГМК). Помимо АО «Учалинский ГОК» в минерально-сырьевой комплекс УГМК также входят ПАО «Гайский ГОК», АО «Сибирь-полиметаллы», АО «Сафьяновская медь», ЗАО «Урупский ГОК», ООО «Башкирская медь», АО «Бурibaевский ГОК», АО «Сибайский ГОК», а также Северный медно-цинковый рудник и Волковское месторождение, работающие в составе АО «Святогор». Ежегодная добыча и переработка руд этими предприятиями составляет более 24 млн т [3].

#### Типы месторождений меди и характеристика медно-колчеданных руд России

На сегодняшний день около 15 % из числа разведанных мировых запасов меди обладает Россия [4]. В целом главные месторождения меди подразделяются на шесть основных типов, имеющих разный характер происхождения и образовавшихся в различных геолого-тектонических обстановках [5–7]:

- медно-порфировые (которые, в свою очередь, подразделяются на золото-медно-порфировые, молибден-медно-порфировые и, соответственно, медно-порфировые подтипы) [8];
- колчеданные (медно-колчеданные, медно-цинково-колчеданные и колчеданно-полиметаллические подтипы);
- стратиформные (заключённые в медистых песчаниках и сланцах);
- сульфидные медно-никелевые;
- скарновые;
- гидротермально-метасоматические.

Колчеданные месторождения представляют собой залежи сернистых (сульфидных) соединений металлов в недрах Земли, которые обладают промышленным значением. Основу данных месторождений составляют руды, состоящие в большинстве своём из сульфидов железа. Такие руды относят к одним из важных источников ряда цветных (медь, цинк, свинец, золото, серебро и др.), редких металлов и рассеянных элементов [9]. По причине роста отраслевых потребностей в стране крайне актуальными являются ряд вопросов: от поиска новых месторождений и продолжения разработки уже известных до нахождения более перспективных комплексных технологий дальнейшей переработки руд и концентратов.

На территории Урала заключены значительные количества колчеданных месторождений, более того, там присутствуют все четыре типа колчеданных месторождений, различающихся по формациям, способам формирования и минеральному составу. Общая

классификация колчеданных месторождений приведена в табл. 1 [9]. По мнению автора [9], за время геологической истории Земли было накоплено порядка 10,7 млрд т руд колчеданного типа, содержащих в себе не менее 121,2 млн т Cu, около 362,6 млн т Zn и более 144 млн т Pb. При этом в долгосрочной перспективе данный тип руд продолжает оставаться ведущим типом медных руд на Урале даже при наличии там и других геолого-промышленных типов, таких как медно-порфировый, медно-скарновый, медистые глины и др. Поэтому с точки зрения важности научно-исследовательских задач и выполнения геолого-разведочных работ крайне актуальным и перспективным является изучение колчеданности Урала, в том числе потенциальной промышленной рудоносности допалеозойских образований (при наличии соответствующих осадочно-вулканогенных ассоциаций) с учетом их высокой глобальной продуктивности.

**Таблица 1.** Классификация колчеданных месторождений  
**Table 1.** Classification of pyrite deposits

Генезис происхождения Genesis of origin	Тип и формация Type and formation
<ul style="list-style-type: none"> <li>• вулканогенные гидротермально-осадочные volcanogenic hydrothermal-sedimentary;</li> <li>• вулканогенные гидротермально-метасоматические volcanogenic hydrothermal-metasomatic;</li> <li>• комбинированные (сочетают в себе две первых группы месторождений) combined (combine the first two groups of deposits)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• кипрский тип (серно-медно-колчеданная кобальтоносная рудная формация)/Surgus type of deposits (sulphur-copper-pyrite cobalt-bearing ore formation);</li> <li>• уральский тип (медно-цинково-колчеданная рудная формация)/Ural type (copper-zinc-sulfide ore formation);</li> <li>• рудноалтайский (Куроко) тип (медно-цинково-колчеданная свинецсодержащая рудная формация)/Rudno-Altai (Kuroko) type (copper-zinc-pyrite lead-bearing ore formation);</li> <li>• филизчайский тип (Бесши) (свинцово-цинково-колчеданная рудная формация)/Filizchay type (Besshi) (lead-zinc-sulfide ore formation)</li> </ul>

С точки зрения рассмотрения основных составляющих минералов колчеданных месторождений можно сделать вывод, что минеральный состав различных типов весьма похож (в частности, главенствующую роль в каждом выполняет пирит), при этом имеют место и различия (табл. 2) [9].

В России большая доля запасов медно-колчеданных руд сосредоточена на территории Южного Урала. Месторождения данного типа по глубине их залегания принято подразделять на три основных группы:

- глубокозалегающие месторождения (Узельгинское, Талганское, Подольское, Ново-Учалинское);
- месторождения средних глубин (Учалинское, Озёрное, Западно-Озёрное, Молодёжное, Октябрьское, Гайское, Сибайское [10], Юбилейное);
- месторождения малых глубин (Чебачье, Камаган, Таш-Тау, Александринское, Майское, Балта-Тау, Восточно-Семёновское).

**Таблица 2.** Минеральный состав руд колчеданных месторождений

**Table 2.** Mineral composition of ores from pyrite deposits

Минералы Minerals	Тип/Type			
	Кипрский Cyprus	Уральский Ural	Рудноалтайский (Куроко) Rudno-Altai (Kuroko)	Филизчайский (Бесши) Filizchay (Besshi)
Главные Main	Пирротин, пирит Pyrrhotite, pyrite	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Пирит, сфалерит, халькопирит, галенит, барит Pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena, barite	Сфалерит, галенит, пирит, барит Sphalerite, galena, pyrite, barite
Широко распространённые Widespread	Магнетит, халькопирит Magnetite, chalcopyrite	Борнит (иногда главный) Bornite (sometimes main)	Блеклые руды, самородное золото Gray ores, native gold	–
Второстепенные Secondary	Пентландит, кобальтин Pentlandite, cobaltite	Магнетит, гематит, пирротин, галенит Magnetite, hematite, pyrrhotite, galena	Пирротин, магнетит, борнит, халькозин, энаргит Pyrrhotite, magnetite, bornite, chalcocite, enargite	Халькопирит Chalcopyrite
Редко встречающиеся Rare	Кубанит, валлериит, никелин, бравоит, миллерит Cubanite, valleriite, nickelite, bravoite, millerite	Блеклые руды, ковеллин, халькозин, арсенопирит, марказит, самородное золото Gray ores, covellite, chalcocite, arsenopyrite, marcasite, native gold	Арсенопирит, магнетит, пирротин, халькозин Arsenopyrite, magnetite, pyrrhotite, chalcocite	Пирротин, магнетит, блеклые руды, марказит Pyrrhotite, magnetite, gray ores, marcasite
Очень редко встречающиеся Very rare	Арсенопирит, платиноиды Arsenopyrite, platinumoids	Энаргит, валлериит, ильменит, теллуросмугит, маккинавит, ильваит, рутил, кубанит, халькозин и др. Enargite, valleriite, ilmenite, tellurobismuthite, mackinawite, ilvaite, rutile, cubanite, chalcocite, etc.	Ковеллин, самородное серебро, валлериит, рутил, арсенопирит, молибденит Covellite, native silver, valleriite, rutile, arsenopyrite, molybdenite	–

Процессы переработки медьсодержащих руд и последующего извлечения из них ценной составляющей зачастую сопровождаются попутным получением ряда других полезных компонентов, в частности в роли одного из таких компонентов выступает цинк (табл. 3) [1]. В целом в области добычи цинка выделяются два основных направления добычи: на территории Урала (республика Башкортостан, Оренбургская, Челябинская и Свердловская области) и в Сибири, соответственно.

**Таблица 3.** Содержание цинка в месторождениях Урала и Сибири

**Table 3.** Zinc content in deposits of the Ural and Siberia

Тип месторождений Type of deposits	Название месторождения Name of deposit	Содержание цинка, % Zn content, %
Медно-колчеданный Copper pyrite	Ново-Учалинское Novo-Uchalinskoe	2,95
	Узельгинское Uzelginskoe	2,4
	Ново-Шемурское Novo-Shemurskoe	1,62
	Юбилейное Yubileynoe	1,26
	Гайское/Gayskoe	0,55
Свинцово-цинковый Lead-zinc	Кызыл-Таштыгское Kyzyl-Tashtygskoe	10,4
	Корбалихинское Korbalihinskoe	10
	Степное/Stepnoe	8,07
	Озёрное/Ozernoe	6,8
	Горевское/Gorevskoe	1,4
	Нойон-Тологой Noyon-Tologoy	1,3

История Учалинского ГОК (предприятие сырьевого комплекса УГМК) насчитывает ~260 млн т добытой руды с семи месторождений (Учалинского и Верхнеуральского районов). Найденные медно-

цинковые колчеданные руды на Учалинском золоторудном месторождении, открытом в 1939 г., дали начало для разработок месторождения в промышленном масштабе. На сегодняшний момент в состав УГОК входят два подземных рудника (Узельгинский и Учалинский, разрабатывающие месторождения медно-колчеданных и медно-цинковых колчеданных руд), карьер и непосредственно обогатительная фабрика, располагающаяся в городе Учалы (республика Башкирия) на которой с 1954 г. получают концентраты посредством обработки добытого сырья. Основные показатели комбината за 2020 г.: добыча – 6,2 млн т руды, выпуск цинка в концентрате – 60,9 тыс. т, выпуск меди в концентрате – 46,3 тыс. т. С целью стабильного функционирования и продолжения деятельности с 2008 г. горняками осуществляется разработка и проводятся горнопроходческие работы на Ново-Учалинском месторождении, открытом в 1986 г., с которым УГОК связывает свою будущую деятельность [11].

В настоящее время на АО «Учалинский ГОК» ведётся переработка шести основных месторождений: Учалинский рудник: Учалинское и Западно-Озёрное месторождения, Узельгинский рудник: Узельгинское, Талганское, Озёрное и Молодёжное месторождения. Также в 2018 г. была вскрыта руда ещё одного месторождения – Ново-Учалинского (2,95 % Zn в руде, 0,99 % Cu в руде). Особенностью последнего из упомянутых месторождений является то, что оно относится к существенно цинковому подтипу (Zn>>Cu), что отличает его от большинства уральских колчеданных залежей [12, 13]. В целом руды данного месторождения по своему минеральному составу не отличаются от типичных руд колчеданных месторождений уральского типа, и среди них выделяют медно-колчеданные (39 % от всех запасов), медно-цинковые колчеданные (54 %) со

средним отношением Cu:Zn=1:3 и серноколчеданные (4 %) [14]. По данным [1] полное завершение строительства и начало эксплуатации Ново-Учалинского месторождения планируется в 2023 г.

**Особенности руд Учалинского и Верхнеуральского меднорудных районов, обогащаемых на УГОК**

Как было отмечено ранее, медно-колчеданные месторождения в первую очередь являются важным ис-

точником таких металлов, как медь и цинк, а также свинец, золото, серебро, мышьяк и т. д.

Наряду с Гайским ГОК Учалинский ГОК является одним из ведущих медеперерабатывающих предприятий на Урале. В совокупности на них приходится более 75 % всего производства медных концентратов и почти 90 % производства цинковых концентратов [15].

**Таблица 4.** Компонентный состав месторождений Учалинского и Верхнеуральского меднорудных районов

**Table 4.** Component composition of the deposits of the Uchalinsky and Verkhneursky copper ore regions

Месторождение Deposit	Главные компоненты Main components	Полезные компоненты Valuable component	Вредные компоненты Harmful component
Учалинское Uchalinskoe	Cu 1,02 %, Zn 3,2 %, S, Au, Ag	Pb, Mo, Co, Ge, Sc, Sn, Pt, V, P	As, Sb, F, Hg
Ново-Учалинское Novo-Uchalinskoe	Cu 0,95 %, Zn 2,6 %, S	Au, Ag, Se, Te, Cd, In	As, Sb, F, Hg
Узельгинское Uzelginskoe	Cu 1,34 %, Zn 2,62 %, S	Au 1,73 г/т, Ag 30,99 г/т, Te, Cd, In, Ba, Pb, Co, Bi, Ni, Ge, Tl	As, Sb, F
Западно-Озёрное Zapadno-Ozernoe	Cu 0,82 %, Zn 0,74 %, S 42,5 %	Se 0,022 %, Au 1,49 г/т, Ag 2,3 г/т, Te, Cd, In, Pb, Ga, Co, Bi, Ni, Ge, Tl	As, Sb, F, Hg
Озёрное Ozernoe	Cu 1,91 %, S	Zn 0,57 %, Au 0,81 г/т, Ag 11,87 г/т, Se 0,034 %, Te, In, Cd, Tl, Ga, Ge, Pb, Co, Bi, Ni	As, Sb, F
Талганское Talganskoe	Cu 3,37 %, Zn 3,39 %, S	Ba, Se, Te, In, Cd, Ga, Tl, Ge	Pb, As, Sb, F, Hg
Молодёжное Molodezhnoe	Cu 2,56 %, Zn 0,52 %, S	Au 2,8 г/т, Ag 58,4 г/т, Ba, Se, Te, In, Cd, Co, Ni, Mo, Bi, Tl, Ge, Ga	As, Sb

**Таблица 5.** Минеральный состав месторождений Учалинского и Верхнеуральского меднорудных районов

**Table 5.** Mineral composition of the deposits of the Uchalinsky and Verkhneursky copper ore regions

Месторождение Deposit	Минералы/Minerals			
	Рудные/Metallic		Нерудные/Non-metallic	
	Главные Main	Второстепенные Minor	Главные Main	Второстепенные Minor
Учалинское Uchalinskoe	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Теннантит, галенит, магнетит, гематит, борнит Tennantite, galena, magnetite, hematite, bornite	Кварц, серицит, хлорит, барит, кальцит Quartz, sericite, chlorite, barite, calcite	Сидерит, гипс, арагонит, гранат, турмалин, опал, монтмориллонит, ярозит, вивианит Siderite, gypsum, aragonite, garnet, tourmaline, opal, montmorillonite, jarosite, vivianite
Ново-Учалинское Novo-Uchalinskoe	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Блеклые руды, галенит, магнетит Gray ores, galena, magnetite	Кварц, барит, серицит, хлорит, кальцит Quartz, barite, sericite, chlorite, calcite	Лейкоксен, аксинит Leucoxene, axinite
Узельгинское Uzelginskoe	Халькопирит, сфалерит, блеклая руда, пирротин, пирротин-пирит Chalcopyrite, sphalerite, gray ores, pyrrhotite-pyrite	Галенит, арсенопирит, магнетит, марказит Galena, arsenopyrite, magnetite, marcasite	Кварц, кальцит, серицит, хлорит и гипс Quartz, calcite, sericite, chlorite, gypsum	Барит Barite
Западно-Озёрное Zapadno-Ozernoe	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Галенит, блеклая руда, марказит, пирротин, арсенопирит Galena, gray ores, marcasite, pyrrhotite, arsenopyrite	Кварц, хлорит, серицит, кальцит, барит Quartz, chlorite, sericite, calcite, barite	Плагиоклаз, амфибол Plagioclase, amphibole
Озёрное Ozernoe	Пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит Pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite	Магнетит, арсенопирит Magnetite, arsenopyrite	Кварц, хлорит, серицит, кальцит Quartz, chlorite, sericite, calcite	Барит Barite
Талганское Talganskoe	Пирит, халькопирит, сфалерит, блеклая руда Pyrite, chalcopyrite, sphalerite, gray ores	Галенит, борнит, гематит Galena, bornite, hematite	Кварц, хлорит, серицит Quartz, chlorite, sericite	Кальцит, барит Calcite, barite
Молодёжное Molodezhnoe	Пирит, сфалерит, халькопирит, борнит, теннантит Pyrite, sphalerite, chalcopyrite, bornite, tennantite	Галенит, магнетит, гематит Galena, magnetite, hematite	Барит, кварц, серицит, хлорит, гипс, кальцит Barite, quartz, sericite, chlorite, gypsum, calcite	Эпидот, флюорит Epidote, fluorite



По минеральному составу и генетическим характеристикам месторождения, принадлежащие Верхнеуральскому и Учалинскому меднорудным районам, соответствуют уральскому типу [16]. Характеристика вещественного состава данных руд приведена в табл. 4, 5 [2].

Учалинское месторождение (одно из самых крупных на Южном Урале) на сегодняшний день практически отработано, помимо этого также дорабатываются запасы ряда других важных месторождений, как Озёрное, Молодёжное, Узельгинское, Талганское. По этой причине целесообразными для переработки являются резервные месторождения (Ново-Учалинское, Западно-Озёрное). Ново-Учалинское месторождение (медно-цинковое колчеданное), расположенное в двух километрах от Учалинского рудника рассматривается с точки зрения его перспективности как сырьевой базы, имеющей возможность восполнить снижающиеся мощности других рудников УГОК.

#### Характеристика концентратов Учалинского ГОК

На базе ОАО «Учалинский ГОК» производится различная основная и вспомогательная продукция, в том числе медный и цинковый концентраты. В результате последовательных стадий обогащения получают готовый медный концентрат (содержание Cu ~17,5 %), медьсодержащий промпродукт (содержание Cu ~7,5 %) и готовый цинковый концентрат (содержание Zn ~49 %) [17].

Порошкообразные образцы промпродукта и медного концентрата, полученные с Учалинского ГОК, были проанализированы с помощью рентгенофазового анализа с целью получения информации об их минеральном составе как одной из важных вспомогательных составляющих для их последующего изучения и разработки технологии, которая смогла бы обеспечить более полное извлечение полезных ком-

понентов сырья и, тем самым, повысить комплексность переработки.

Далее посредством использования многофункционального рентгеновского дифрактометра ДРОН-8 (АО «ИЦ «Буревестник») с применением рентгеновской трубки типа 1,5 БСВ-29Cu была осуществлена оценка минералогического состава проб. Данные рентгенофазового анализа приведены в табл. 6, на рис. 2, 3 приведены полученные изображения дифрактограмм с нанесёнными метками фаз на соответствующих пиках. Также для большей наглядности данные табл. 6 приведены на рис. 1 в виде круговых диаграмм.

Таблица 6. Данные рентгенофазового анализа (концентрата и промпродукта УГОК)

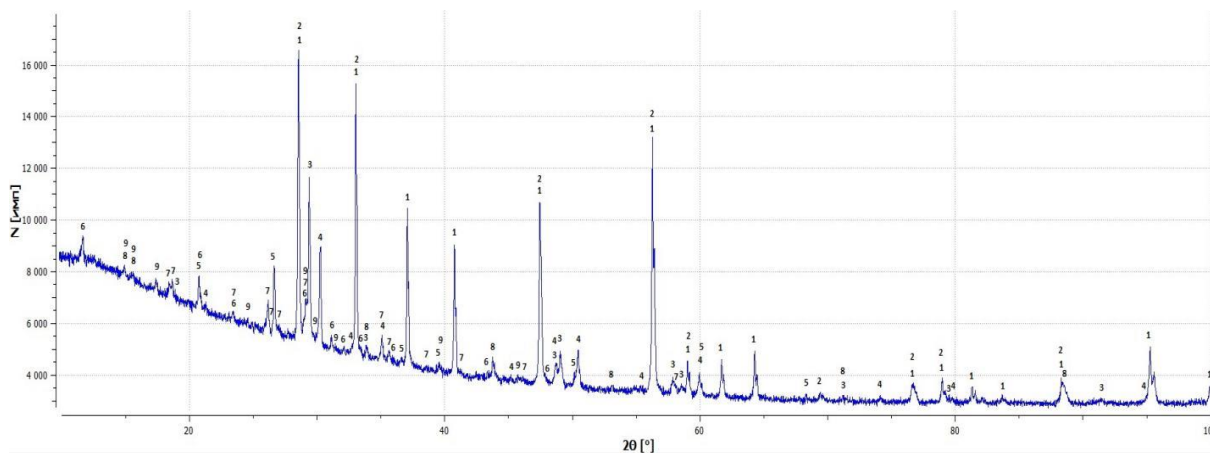
Table 6. XRD analysis data (concentrate and middling product of Uchalinsky Mining and Processing Plant)

Минерал Mineral	Химическая формула Chemical composition	Содержание фаз Phase content, %			
		Концентрат Concentrate		Промпродукт Middling product	
Пирит/Pyrite	FeS <sub>2</sub> (cubic)	~20	40	~35	55
Сфалерит Sphalerite	ZnS (cubic)	~9		~20	
Халькопирит Chalcopyrite	CuFeS <sub>2</sub> (tetragonal)	55		16	
Теннантит Tennantite	Cu <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub> (cubic)	9		10	
Кварц/Quartz	SiO <sub>2</sub> (hexagonal)	–		7	
Гипс Gypsum	CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O (monoclinic)	1		4	
Гуннингит Gunningite	ZnSO <sub>4</sub> *H <sub>2</sub> O (monoclinic)	2		4	
Пирротин Pyrrhotite	Fe <sub>1-x</sub> S (hexagonal)	1		2	
Бёдантит Beaudantite	PbFe <sub>3</sub> ((As,S)O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> (rhombohedral)	3		2	



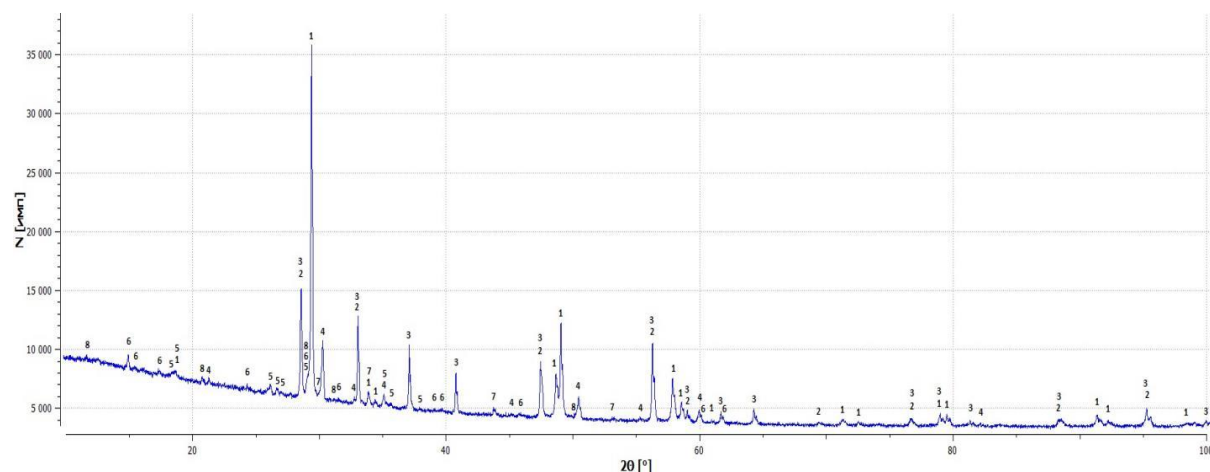
Рис. 1. Графическое изображение содержания фаз в образцах концентрата и промпродукта

Fig. 1. Graphical representation of the content of phases in samples of concentrate and middling product



**Рис. 2.** Рентгенограмма промпродукта УГОК, где 1 –  $FeS_2$ , 2 –  $ZnS$ , 3 –  $CuFeS_2$ , 4 –  $Cu_{12}As_4S_{13}$ , 5 –  $SiO_2$ , 6 –  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , 7 –  $ZnSO_4 \cdot H_2O$ , 8 –  $Fe_{1-x}S$ , 9 –  $PbFe_3((As,S)O_4)_2(OH)_6$

**Fig. 2.** XRD pattern for middling product, where 1 –  $FeS_2$ , 2 –  $ZnS$ , 3 –  $CuFeS_2$ , 4 –  $Cu_{12}As_4S_{13}$ , 5 –  $SiO_2$ , 6 –  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , 7 –  $ZnSO_4 \cdot H_2O$ , 8 –  $Fe_{1-x}S$ , 9 –  $PbFe_3((As,S)O_4)_2(OH)_6$



**Рис. 3.** Рентгенограмма медного концентрата УГОК, где 1 –  $CuFeS_2$ , 2 –  $ZnS$ , 3 –  $FeS_2$ , 4 –  $Cu_{12}As_4S_{13}$ , 5 –  $ZnSO_4 \cdot H_2O$ , 6 –  $PbFe_3((As,S)O_4)_2(OH)_6$ , 7 –  $Fe_{1-x}S$ , 8 –  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

**Fig. 3.** XRD pattern for concentrate, where 1 –  $CuFeS_2$ , 2 –  $ZnS$ , 3 –  $FeS_2$ , 4 –  $Cu_{12}As_4S_{13}$ , 5 –  $ZnSO_4 \cdot H_2O$ , 6 –  $PbFe_3((As,S)O_4)_2(OH)_6$ , 7 –  $Fe_{1-x}S$ , 8 –  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Данные о минералогическом составе показали, что содержание халькопирита в концентрате возросло более чем в три раза по сравнению с его количеством в промпродукте, при этом количество остальных соединений снизилось значительно, в частности содержание пирита и сфалерита снизилось почти в два раза, что можно отметить и для большинства остальных обнаруженных в образцах соединений. Также стоит отметить, что содержание вспомогательных элементов (в частности, таких как цинк и мышьяк) при их пересчёте в целом находится на уровне, рациональном для их сопутного извлечения из сырья.

#### Возможности и перспективы последующей переработки Учалинских концентратов

Как было указано ранее, в целом для руд данного региона можно отметить снижение содержания ценных компонентов, при этом отмечается рост содержания таких элементов, как мышьяк, сурьма, свинец, ртуть, фтор. В связи с этим такое сырье характеризуется мультикомпонентностью, структурными особенностями и сложностью переработки.

Исследования возможности оптимизации технологических схем переработки рассматриваемых концентратов являются весьма актуальными, и одной из основных причин этому служит высокое содержание представляющих ценность побочных компонентов, входящих в их состав, например, таких как мышьяк и цинк. На сегодняшний день были проведены эксперименты по определению эффективности селективного извлечения мышьяка. В работе [18] были осуществлены опыты по щелочному сульфидному выщелачиванию концентрированным раствором (смесь сульфида и гидроксида натрия) с целью перевода сульфидов мышьяка в растворимые формы. Щелочное выщелачивание медных концентратов и промежуточных продуктов сульфидом натрия эффективно удаляет мышьяк и обеспечивает получение «чистого» медного продукта. В связи с этим селективное выщелачивание мышьяка и сурьмы сернистым натрием в щелочных растворах является весьма перспективным способом улучшения качества медных концентратов для последующей плавки.

Выбор наиболее эффективной методики для выделения такого полезного компонента, как цинк, из продуктов, получаемых на УГОК, остаётся открытым. В ряде научных статей приведена информация о существующих вариантах переработки колчеданного сырья, в том числе с высоким содержанием цинка. В настоящий момент освоены два основных пути переработки таких концентратов – пирометаллургические способы и гидрометаллургические технологии. Несмотря на то, что применение пиро-процессов всё ещё является преобладающим вариантом при переработке такого сырья, мы можем наблюдать постепенный рост уровня производства меди и цинка с помощью гидрометаллургических методов [19–22].

В целом нельзя отрицать целесообразность перехода от стандартных способов обработки материалов, получивших широкое распространение в производстве (для которых всё чаще становится характерным снижение эффективности и с экономической точки зрения и во многих случаях с точки зрения их пагубного воздействия на экологию (в случае применения пирометаллургических технологий)) к разработке и последующему применению новых способов комплексной переработки сложного, а также зачастую более низкосортного исходного сырья (такого как хвостовые отвалы, бедные забалансовые руды и различные отходы производства). Такая смена направления схем производства позволит обеспечить положительные результаты и сохранить прибыльность металлургического сектора.

В настоящее время подавляющая часть способов переработки медно-цинкового сырья основана на

проведении пирометаллургических операций. В ходе пиро-процессов происходит полная потеря цинка, поскольку в данных условиях этот металл полностью переходит в шлак медной плавки. В этой связи в качестве альтернативного варианта пиро-процессам для извлечения металлов, в том числе цинка, из некондиционного сырья возможно применение гидрометаллургических технологий [23]. При этом важно заметить, что гидрометаллургические схемы переработки могут вызывать ряд трудностей, так весьма сложной может быть переработка медно-цинковых сульфидных концентратов с содержанием цинка до 18 % по причине того, что эксплуатируемые на данный момент гидро-процессы позволяют получить лишь такие растворы, которые не могут быть использованы для последующего производства товарной продукции по причине низкого содержания цинка в них.

В качестве одного из вариантов, дающих возможность улучшить показатели переработки сульфидных концентратов (в частности, медных с высоким содержанием цинка), а также уменьшить степень применения пирометаллургических процессов для переработки медно-цинкового сырья, выступает автоклавное выщелачивание, в котором с помощью высоких давлений и температур газа достигаются довольно высокие показатели уровня и скорости вскрытия сырья. К таким схемам можно отнести проект MT Gordon [24], процессы Platsol [25] и CESL (Cominco Engineering Services Ltd.) [26], процесс ГТО [27] (гидротермальная обработка) и др. Один из вариантов технологической схемы с использованием автоклавного выщелачивания приведён на рис. 4.

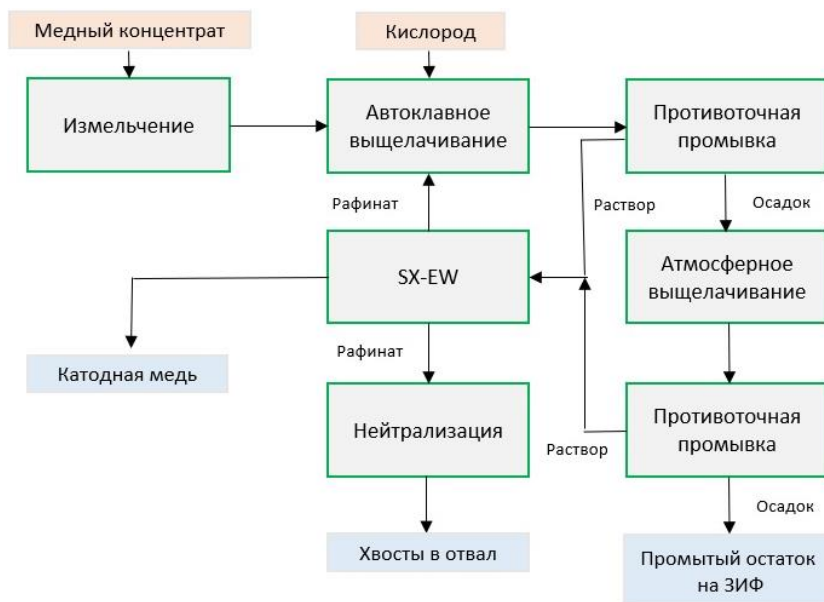


Рис. 4. Технологическая схема процесса CESL

Fig. 4. CESL process flow diagram

Помимо автоклавных технологий, существует ряд методов, не требующих высоких показателей температуры и/или давления, такие схемы объединены в группу под общим названием «технологии атмосферного выщелачивания». Например, с целью увеличе-

ния показателей извлечения меди (в частности, из халькопирита) были детально изучены и разработаны ряд технологических решений; к таким технологиям можно отнести: 1 – высокотемпературный процесс, разумно контролируемый в условиях атмосферного

давления (процесс BioCOP [28]); 2 – применение тонкого измельчения с целью увеличения реакционной способности материала без проявления пассивации (технологии VacTech/Mintek [29, 30]); 3 – использование действия специальных добавок (технология Galvanox [31]); 4 – применение инновационных комбинаций технологий переработки (процесс Geosort [32]), а также варианты технологических решений, таких как технологии HydroCopper [33], Intec Copper Process [34], Albion [35]. Стоит отметить, что вариант атмосферного окисления обладает более низкими капитальными и эксплуатационными затратами относительно автоклавных методов и биоокисления.

В результате анализа существующих вариантов и схем переработки было принято решение о более по-

дробном изучении последнего из упомянутых ранее вариантов (процесс Альбион). Данная технология, разработанная в 1994 г. [36], нетребовательна к составу используемого сырья, что делает переработку низкосортных медных концентратов рентабельным процессом (технологическая схема приведена на рис. 5). Помимо этого, преимуществом данной технологии также является низкая капиталозатратность относительно автоклавных способов переработки. В связи с этим в дальнейшем будет проведён ряд лабораторных опытов с целью определения целесообразности применения данной технологии, а также достижения желаемых результатов при использовании выбранной схемы переработки медных концентратов с высоким содержанием цинка.

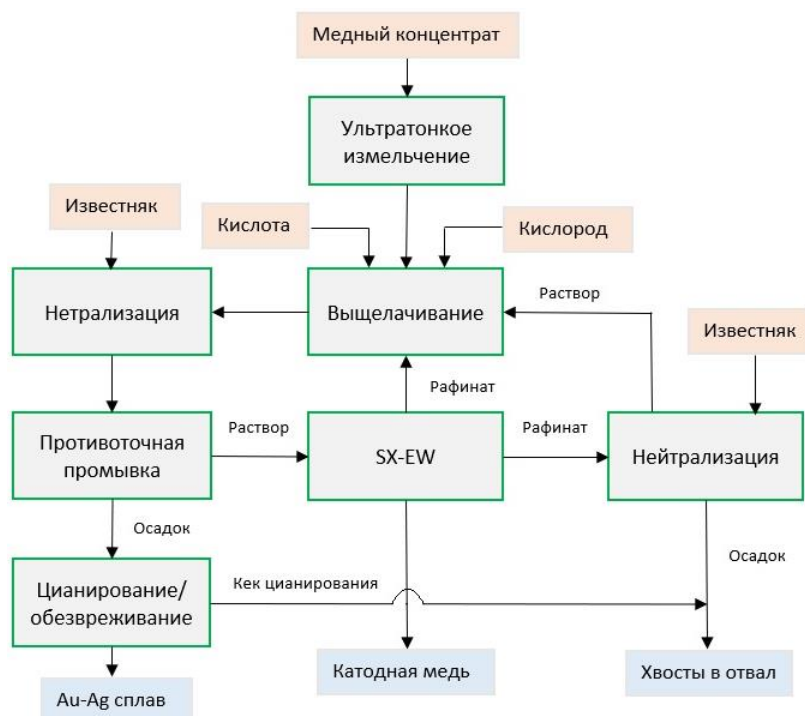


Рис. 5. Технологическая схема процесса Albion

Fig. 5. Albion process flow diagram

Как было отмечено ранее, переработку сложного по составу мультикомпонентного сырья важно осуществлять таким образом, чтобы достичь как можно большего извлечения всех ценных компонентов, при этом на текущий момент показатели комплексности переработки применяемых методов далеки от рациональных. Одним из вариантов решения данного вопроса является проведение операций гидрометаллургического кондиционирования. Разработка технологии по кондиционированию низкосортных цинксо-  
 держащих медных концентратов, гарантирующей как улучшение качества, так и получение дополнительной продукции (основа которой представлена цинком) с высокой добавочной стоимостью, позволит в максимальной степени уменьшить потери меди и цинка, повысить уровень сорта некондиционного медного концентрата до товарного, а также осуществить выпуск дополнительной товарной продукции – цинко-

вый концентрат. Так, ожидается, что при проведении сернокислотного высокотемпературного атмосферного выщелачивания медного концентрата с высоким содержанием цинка в непрерывном режиме показатели извлечения меди и цинка будут достигать уровня ~90 %. Таким образом, всё вышперечисленное позволит минимизировать потери ценных компонентов, оптимизировать операции дальнейшей переработки, достичь лучших показателей извлечения и, как следствие, увеличить прирост денежного потока.

#### Заключение

На текущий момент удовлетворение растущего спроса на цветные металлы в России в большинстве своём осуществляется за счёт роста объёмов добычи руды (всё больше в отработку вовлекаются месторождения с неблагоприятными горнотехническими условиями: малой мощностью, сложной геометрией и

невыдержанностью рудных тел, а также низким содержанием полезного компонента в рудах) вместо внедрения усовершенствованных технологий её глубокой переработки, а также разработки последующих комплексных схем извлечения ценных компонентов из концентратов. По этой причине свыше 90 % добытых руд (в том числе медно-колчеданных) всё ещё направляются в хвостохранилища, несмотря на содержание в этих отвалах, помимо вредных составляющих, ценных компонентов, редких элементов и благородных металлов. В связи с этим крайне актуальным является вопрос поиска и изучения вариантов комплексной переработки таких мультикомпонентных и сложнообогатимых материалов.

В настоящий момент запасы богатых и рядовых руд истощаются, вследствие чего в большей мере прибегают к эксплуатации месторождений с низкими содержаниями полезных компонентов [20, 37, 38]. Около половины меди, существенная доля серебра и почти весь цинк, кадмий и индий добываются в России из руд колчеданных месторождений, из которых также попутно извлекают золото, никель, кобальт и другие полезные компоненты [12].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году». – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2021. – 568 с.
2. Пешков А.М. Обоснование требований к качеству руд и техногенного сырья при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений Урала: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 160 с.
3. Горнодобывающая промышленность. URL: [https://www.ugmk.com/activity/primary\\_production/gornodobyvayushchaya-promyshlennost/](https://www.ugmk.com/activity/primary_production/gornodobyvayushchaya-promyshlennost/) (дата обращения: 09.09.2022).
4. Баранников А.Г. Поиски и разведка ведущих геолого-промышленных типов месторождений полезных ископаемых. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2011. – 183 с.
5. ФБУ «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых». Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды. – М.: ФГУ ГКЗ, 2007. – 40 с.
6. Кривцов А.И., Клименко Н.Г. Минеральное сырье. Медь: справочник. – М.: Геоинформмарк, 1997. – 52 с.
7. Быховер Н.А. Распределение мировых ресурсов минерального сырья по эпохам рудообразования. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 576 с.
8. Опыт освоения месторождений медно-порфирирового типа на Урале / И.А. Алтушкин, В.В. Левин, А.В. Сизиков, Ю.А. Король // Записки Горного института. – 2017. – Т. 228. – С. 641–648.
9. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы): научная монография. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2013. – 199 с.
10. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Геохимия техногенеза в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения // Записки Горного института. – 2013. – Т. 203. – С. 196–204.
11. Родное рудное сердце Башкирии – Учалинский ГОК. URL: <https://mkset.ru/article/general/01-04-2021/rodnoe-rudnoe-serdtse-bashkirii-uchalinskiy-gok> (дата обращения: 09.09.2022).
12. Детализация морфологии рудной залежи Ново-Учалинского колчеданного месторождения (Южный Урал) / А.В. Спирина, В.В. Макаров, И.Б. Моисеев, И.В. Викентьев // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2020. – Т. 63. – № 2. – С. 35–46.
13. Александрова Т.Н., Ушаков Е.К., Орлова А.В. Метод типизации медно-цинковых руд сложного состава с применением

вовлечение в переработку материалов со всё более низкими содержаниями полезных компонентов становится неизбежным с каждым годом. В частности, один из ярких примеров такого комплексного сырья – колчеданные медно-цинковые руды, являющиеся одним из основных источников получения медных и цинковых концентратов. Предмет выбора и разработки технологии их обогащения и переработки с высокими выходными показателями является крайне затруднительным и требующим поиска рационального комплексного решения [38].

В 2021 г. Главгосэкспертизой России было выдано положительное заключение по проекту отработки запасов руды Ново-Учалинского месторождения (с балансовыми запасами порядка 116 млн т) подземным способом. Предполагаемый объем добычи после окончания всех разработок и выхода на полную мощность составит 4,5 млн т руды в год. Предприятие специализируется на добыче и переработке медно-колчеданных руд и последующем получении цинкового, медного и пиритного концентратов. УГОК осуществляет добычу руд на Узельгинском, Учалинском, Ново-Учалинском, Озёрном, Западно-Озёрном, Молдёмном и Талганском месторождениях [39].

- нейросетевых моделей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 5. – С. 140–147.
14. Пирожок П.И. Геологическое строение, зональность и генезис Новоучалинского колчеданного месторождения (Южный Урал) // Известия УГТУ. – 2016. – Т. 43. – № 3. – С. 7–12.
15. Совершенствование техники и технологии на Учалинской обогатительной фабрике в период 2000–2008 гг. / И.А. Абдрахманов, Р.А. Ягудин, А.В. Зимин, М.А. Арустамян, Е.П. Калинин // Горный журнал. – 2008. – № 1. – С. 78–82.
16. Прокин В.А., Буслев Ф.П., Исмагилов М.И. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – 248 с.
17. УГОК. Основное производство. Обогатительная фабрика. URL: [https://www.ugok.ru/ru/activity/primary\\_production/obogatitel'naya-fabrika/](https://www.ugok.ru/ru/activity/primary_production/obogatitel'naya-fabrika/) (дата обращения: 09.09.2022).
18. Kobylanski A., Zhukova V., Grigoreva V., Boduen A.Ya. Recent technologies in selective removal of arsenic in copper ore processing. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2021. pp. 196–202.
19. Theoretical foundations and technological capabilities of hydrocarbonyl process of recovering copper from technogenic wastes / I.V. Fedoseev, M.S. Barkan, A.V. Kornev, A.S. Danilov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2018. – V. 19 (5). – P. 33–37.
20. Аммиачно-автоклавная технология переработки низкокачественных концентратов флотационного обогащения медистых песчаников / А.Я. Бодуэн, С.Б. Фокина, Г.В. Петров, Ю.В. Андреев // Обогащение руд. – 2019. – № 2. – С. 33–38.
21. Пожидаева С.Д., Агеева Л.С., Иванов А.М. Сравнительная характеристика окисления цинка и олова с участием кислот при комнатных температурах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 38–46.
22. Хайнасова Т.С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 47–54.
23. Two-stage leaching of copper-zinc concentrate containing tennantite / A.V. Artykova, V.S. Melamud, A.Ya. Boduen, A.G. Bulaev // *AGRITeCH-III-2020*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – P. 548.
24. Зайцев П.В., Шнеерсон Я.М. Автоклавные переработки медьсодержащего сырья // Цветные металлы. – 2016. – № 4. – С. 26–31.
25. Sinisalo P., Lundström M. Refining approaches in the platinum group metal processing value chain – a review // *Metals*. – 2018. – V. 8 (4). – P. 1–12.

26. Wieszczycka K. Wastes generated by mineral extraction industries // Physical Sciences Reviews. – 2018. – V. 3 (6). – P. 1–22.
27. Weidenbach M., Dunn G., Yong Yong Teo. Removal of impurities from copper sulfide mineral concentrates // ALTA 7th Nickel-Cobalt-Copper Conference. – Perth, Australia, 2016. – P. 335–351.
28. Batty J.D., Rorke G.V. Development and commercial demonstration of the BioCOP™ thermophile process // Hydrometallurgy. – 2006. – V. 83. – P. 83–89.
29. Van Staden P.J. The Mintek/Bactech copper bioleach process // ALTA 1998 Copper Sulphides Symposium. – Brisbane: ALTA Metallurgical Services, 1998. – P. 507–520.
30. Gericke M., Neale J.W., Van Staden P.J. Mintek perspective of the past 25 years in minerals bioleaching // J. South. Afr. Inst. Min. Metall. – 2009. – V. 109. – P. 567–585.
31. Dixon D.G., Mayne D.D., Baxter K.G. Galvanox™ – a novel galvanically assisted atmospheric leaching technology for copper concentrates // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2008. – V. 47 (3). – P. 327–336.
32. Harvey T.J., Bath M. The GeoBiotics GEOCOAT Technology – Progress and Challenges // Biomining / Eds. D.E. Rawlings, D.B. Johnson. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – P. 97–112.
33. Dissolution of six sulfide concentrates in the Hydrocopper environment / M. Lundström, J. Lipo, J. Karonen, J. Aromaa // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Base Metals Conference. – Botswana, 2009. – P. 127–138.
34. Sammut D., Welham N.J. The Intec copper process: a detailed environmental analysis // Green Processing. – Cairns, QLD, 29–31 May 2002. – P. 115–124.
35. Albion process. Simplicity in leaching. Introduction to the Albion process // Albion Process™ Simplicity in leaching. URL: <https://www.albionprocess.com/en/Pages/home.aspx> (дата обращения: 09.09.2022).
36. Houn M., Turner D.W. Commercialisation of Albion process // Nickel-Cobalt-Copper, Uranium & Gold Conference. – Perth, Australia, 2012. – P. 231–248.
37. Обзор современных технологий переработки упорных золото-содержащих руд и концентратов с применением азотной кислоты / Д.В. Гордеев, Г.В. Петров, А.В. Хасанов, О.В. Северинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 214–224.
38. Бодуэн А.Я., Иванов Б.С., Коновалов Г.В. Влияние повышения качества медных концентратов на эффективность их переработки // Записки Горного института. – 2011. – Т. 192. – С. 46–48.
39. Главгосэкспертиза одобрила проект отработки Ново-Учалинского рудника в Башкирии. URL: <https://gge.ru/press-center/news/glavgosekspertiza-odobrila-proekt-otrabotki-novo-uchalinskogo-rudnika-v-bashkirii/> (дата обращения: 09.09.2022).

Поступила: 22.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 07.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Васильева А.А.**, аспирант кафедры металлургии, Санкт-Петербургский Горный университет.

**Бодуэн А.Я.**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Санкт-Петербургский Горный университет.

UDC 669.02.09

## MINERALOGICAL FEATURES AND PROCESSING OF COPPER ZINC-CONTAINING CONCENTRATES (UCHALINSKY MINING AND PROCESSING PLANT)

Anna A. Vasileva<sup>1</sup>,  
fml0914@mail.ru

Anna Ya. Boduen<sup>1</sup>,  
Boduen\_aya@pers.spmi.ru

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University,  
2, 21<sup>st</sup> Line, Saint-Petersburg, 199106, Russia.

**Relevance.** Copper-pyrite ores of Russia are the basis of the mineral resource base of the country's metallurgical industry, primarily providing copper and zinc, and metals such as Pb, Au, Ag, etc. Today, about 25 % of the total balance reserves of zinc of the country is in the composition of copper pyrite ores, the role of the main component in which is performed by copper. The result of the flotation enrichment of copper pyrite ores is the production of substandard copper concentrates (Cu content ~15–20 %, Zn content ≥5 %). The pyrometallurgical processing of such materials into blister copper is characterized by high costs, as well as irretrievable losses of valuable components. Today, the issues of studying the characteristics of raw materials and deposits, developing technologies for processing copper- and zinc-containing materials, as well as analyzing existing and promising processing options are relevant and, as a result, can have positive effect both in terms of the complexity of using raw materials, improving the quality of the resulting products and the degree of their extraction, and, consequently, from an economic point of view.

**The aim:** analysis of the characteristics of copper zinc-bearing ores, in particular, the ores of the Uchalinsky and Verkhneursky copper ore regions enriched at the Uchalinsky mining and processing plant, mineralogical assessment of the concentrates of the Uchalinsky mining and processing plant, followed by the selection of promising options for processing low-grade copper concentrates based on hydro-metallurgical processing methods.

**Methods.** The analysis of data on the main types of copper deposits, the characteristics of copper pyrite ores in Russia, as well as more detailed data on ores enriched at the mining and processing plant was carried out on the basis of a review of domestic and foreign literary and information sources. Also, an analysis of the concentrate and middlings of the Uchalinsky mining and processing plant was carried out. Due to the information obtained through the combination of the above methods, an assessment was made and information on possible options for improving the processing technologies of the studied raw materials was presented.

**Results.** Thanks to the study and development of more integrated approaches in processing materials with a low content of useful components and complex raw materials, in particular, studied in this work, in the future it will be possible to achieve improved technological performance from both an economic and environmental point of view. In this paper, the raw materials and products used and obtained, respectively, at the Uchalinsky mining and processing plant, the Republic of Bashkiria, will be considered in more detail.

### Key words:

copper concentrates, hydrometallurgical conditioning, atmospheric leaching, sulphide raw material, autoclave oxidation, mechanical activation.

### REFERENCES

1. Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu» [State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2020»]. Moscow, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation Publ., 2021. 568 p.
2. Peshkov A.M. *Obosnovanie trebovaniy k kachestvu rud i tekhnogennogo syr'ya pri kompleksnom osvoenii medno-kolchedannykh mestorozhdeniy Urala*. Diss. Kand. nauk [Substantiation of requirements for the quality of ores and technogenic raw materials in the complex development of copper pyrite deposits in the Urals. Cand. Diss.] Moscow, 2014. 160 p.
3. *Gornodobyvayushchaya promyshlennost* [Mining Industry]. Available at: [https://www.ugmk.com/activity/primary\\_production/gornodobyvayushchaya-promyshlennost/](https://www.ugmk.com/activity/primary_production/gornodobyvayushchaya-promyshlennost/) (accessed 9 September 2022).
4. Barannikov A.G. *Poiski i razvedka vedushchikh geologo-promyshlennykh tipov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Search and exploration of leading geological and industrial types of mineral deposits]. Ekaterinburg, USMU Publ., 2011. 183 p.
5. FBU «Gosudarstvennaya komissiya po zapasam poleznykh iskopaemykh». *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Mednye rudy* [Guidelines for the application of the classification of deposits and inferred resources of solid minerals. Copper ores]. Moscow, Federal State Institution «State Commission for Mineral Reserves» Publ., 2007. 40 p.
6. Krivtsov A.I., Klimenko N.G. *Mineralnoe syr'e. Med: spravochnik* [Mineral raw materials. Copper: handbook]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1997. 52 p.
7. Bykhover N.A. *Raspredelenie mirovykh resursov mineralnogo syr'ya po epokham rudoobrazovaniya* [Distribution of world resources of mineral raw materials by epochs of ore formation]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ., 1984. 576 p.
8. Altushkin I.A., Levin V.V., Sizikov A.V., Korol Yu.A. Experience in the development of porphyry copper deposits in the Urals. *Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 228, pp. 641–648. In Rus.
9. Kontar E.S. *Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdeniy medi, tsinka, svintsa na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy): nauchnaya monografiya* [Geological and industrial types of deposits of copper, zinc, lead in the Urals (geological conditions of location, history of formation, prospects): scientific monograph]. Ekaterinburg, USMU Publ., 2013. 199 p.
10. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G. Geochemistry of technogenesis in the area of development of the Sibay copper-pyrite deposit. *Journal of Mining Institute*, 2013, vol. 203, pp. 196–204. In Rus.
11. *Rodnoe rudnoe serdtse Bashkirii – Uchalinskiy GOK* [Native ore heart of Bashkiria – Uchalinsky plant]. Available at: <https://mkset.ru/article/general/01-04-2021/rodnoe-rudnoe-serdtse-bashkirii-uchalinskiy-gok> (accessed 9 September 2022).
12. Cpirina A.V., Makarov V.V., Moiseev I.B., Vikentev I.V. Detailing the morphology of the ore deposit of the Novo-Uchalinskoe pyrite deposit (Southern Urals). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 35–46. In Rus.

13. Aleksandrova T.N., Ushakov E.K., Orlova A.V. Method of typing of copper-zinc ores of complex composition using neural network models. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 5, pp. 140–147. In Rus.
14. Pirozhok P.I. Geological structure, zonality and genesis of the Novouchalinsky sulfide deposit (Southern Urals). *News of the Ural State Mining University*, 2016, vol. 43, no. 3, pp. 7–12. In Rus.
15. Abdrakhmanov I.A., Yagudin R.A., Zimin A.V., Arustamyan M.A., Kalinin E.P. Improvement of equipment and technology at the Uchalinsky enrichment plant in the period 2000–2008. *Mining Journal*, 2008, no. 1, pp. 78–82. In Rus.
16. Prokin V.A., Buslaev F.P., Ismagilov M.I. *Mednokolchedamnye mestorozhdeniya Urala. Geologicheskoe stroenie* [Copper pyrite deposits in the Urals. Geological structure]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1988. 248 p.
17. UGOK. *Osnovnoe proizvodstvo. Obogatitel'naya fabrika* [Uchalinsky GOK. Primary production. Enrichment enterprise]. Available at: [https://www.ugok.ru/ru/activity/primary\\_production/obogatitel'naya-fabrika/](https://www.ugok.ru/ru/activity/primary_production/obogatitel'naya-fabrika/) (accessed 9 September 2022).
18. Kobylanski A., Zhukova V., Grigoreva V., Boduen A.Ya. Recent technologies in selective removal of arsenic in copper ore processing. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2021. pp. 196–202.
19. Fedoseev I.V., Barkan M.S., Kornev A.V., Danilov A.S. Theoretical foundations and technological capabilities of hydrocarbonyl process of recovering copper from technogenic wastes. *Journal of Ecological Engineering*, 2018, vol. 19 (5), pp. 33–37.
20. Boduen A., Fokina S., Petrov G., Andreev Yu. Ammonia autoclave technology for the processing of low-grade concentrates generated in flotation concentration of cupriferous sandstones. *Obogashchenie Rud*, 2019, vol. 2, pp. 33–38. In Rus.
21. Pozhidaeva S.D., Ageeva L.S., Ivanov A.M. Comparative characteristics of the oxidation of zinc and tin with the participation of acids at room temperatures. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 38–46. In Rus.
22. Khaynasova T.S. Actors affecting bacterial and chemical processes of processing sulfide ores. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 47–54. In Rus.
23. Artykova A.V., Melamud V.S., Boduen A.Ya., Bulaev A.G. Two-stage leaching of copper-zinc concentrate containing tennantite. *AGRITECH-III-2020. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, pp. 548.
24. Zaitsev P.V., Shneerson Ya.M. Autoclave processing of copper-containing raw materials. *Metals and Alloys*, 2016, no. 4, pp. 26–31. In Rus.
25. Sinisalo P., Lundström M. Refining approaches in the platinum group metal processing value chain – a review. *Metals*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 1–12.
26. Wieszczycka K. Wastes generated by mineral extraction industries. *Physical Sciences Reviews*, 2018, vol. 3, no. 6, pp. 1–22.
27. Weidenbach M., Dunn G., Yong Yong Teo. Removal of impurities from copper sulfide mineral concentrates. *ALTA 7th Nickel-Cobalt-Copper Conference*. Perth, Australia, 2016. pp. 335–351.
28. Batty J.D., Rorke G.V. Development and commercial demonstration of the BioCOP™ thermophile process. *Hydrometallurgy*, 2006, vol. 83, pp. 83–89.
29. Van Staden P.J. The Mintek/Bactech copper bioleach process. *ALTA 1998 Copper Sulphides Symposium*. Brisbane, ALTA Metallurgical Services, 1998. pp. 507–520.
30. Gericke M., Neale J.W., Van Staden P.J. Mintek perspective of the past 25 years in minerals bioleaching. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall*, 2009, vol. 109, pp. 567–585.
31. Dixon D.G., Mayne D.D., Baxter K.G. Galvanox™ – a novel galvanically assisted atmospheric leaching technology for copper concentrates. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2008, vol. 47, no. 3, pp. 327–336.
32. Harvey T.J., Bath M. The GeoBiotics GEOCOAT Technology – Progress and Challenges. *BioMining*. Eds. D.E. Rawlings, D.B. Johnson. Berlin, Heidelberg, Springer, 2007. pp. 97–112.
33. Lundström M., Liipo J., Karonen J., Aromaa J. Dissolution of six sulfide concentrates in the Hydrocopper environment. *Base Metals Conference*. Botswana, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. pp. 127–138.
34. Sammut D., Welham N.J. The Intec copper process: a detailed environmental analysis. *Green Processing*. Cairns, QLD, 29–31 May 2002. pp. 115–124.
35. *Albion process. Simplicity in leaching. Introduction to the Albion Process*. Available at: <https://www.albionprocess.com/en/Pages/home.aspx> (accessed 9 September 2022)
36. Hourn M., Turner D.W. Commercialisation of Albion Process. *Nickel-Cobalt-Copper, Uranium & Gold Conference*. Perth, Australia, 2012. pp. 231–248.
37. Gordeev D.V., Petrov G.V., Khasanov A.V., Severinova O.V. Review of modern processing technologies of refractory gold ores and concentrates with use of nitric acid. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 214–223. In Rus.
38. Boduyen A.Ya., Ivanov B.S., Konovalov G.V. The impact of improving the quality of copper concentrates on the efficiency of their processing. *Journal of Mining Institute*, 2011, vol. 192, pp. 46–48. In Rus.
39. *Glavgosekspertiza odobrila proekt otrabotki Novo-Uchalinskogo rudnika v Bashkirii* [The main state expertise approved the development project of the Novo-Uchalinsky mine in Bashkiria]. Available at: <https://gge.ru/press-center/news/glavgosekspertiza-odobrila-proekt-otrabotki-novo-uchalinskogo-rudnika-v-bashkirii/> (accessed 9 September 2022).

Received: 22 November 2022.

Reviewed: 7 December 2022.

#### Information about the authors

**Anna A. Vasileva**, postgraduate student, Saint-Petersburg Mining University.

**Anna Ya. Boduen**, Cand. Sc., assistant professor, Saint-Petersburg Mining University.



УДК 66.092-977

## НЕСТАЦИОНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИРОЛИЗА БЕНЗИНОВОЙ ФРАКЦИИ

Бунаев Аюр Алексеевич<sup>1</sup>,  
aab70@tpu.ru

Долганов Игорь Михайлович<sup>1</sup>,  
dolganovim@tpu.ru

Долганова Ирэна Олеговна<sup>1</sup>,  
dolganovaio@tpu.ru

Юрьев Егор Михайлович<sup>1</sup>,  
emyu@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью увеличения производства алкенов, а также углубления понимания процесса коксообразования. Направлением развития нефтехимического комплекса и повышения эффективности процесса пиролиза является ресурсосбережение, минимизация эксплуатационных затрат и вероятности возникновения аварий.

**Цель:** разработка математической модели пиролиза бензиновой фракции, которая будет учитывать коксообразование и его влияние на кинетическую, гидродинамическую и термодинамическую составляющие процесса.

**Объект:** процесс пиролиза бензиновой фракции; динамика состава углеводородного потока и побочные процессы коксообразования.

**Методы.** Методологической основой исследования является системный анализ и метод математического моделирования. Помимо этого, применяются квантово-химические методы расчета термодинамических и кинетических параметров целевых и побочных химических реакций, протекающих при переработке углеводородного сырья, и электронно-структурные методы, основанные на теории функционала плотности (DFT – Density Functional Theory); методы вычислительной гидродинамики для исследования режимов движения потока и отложения частиц кокса на стенках змеевика; разработанные экспериментальные методики определения оптимального расхода углеводородного сырья и водяного пара, прогнозирования длительности межрегенерационного цикла печи пиролиза.

**Результаты.** Разработана нестационарная модель процесса пиролиза бензиновой фракции, описывающая побочный процесс коксообразования по длине пиролизного змеевика и с течением времени. С помощью модели рассчитана скорость образования слоя кокса с учетом технологических параметров и состава сырья. Расчетная скорость составляет  $3,12 \cdot 10^{-7}$  мм в секунду. Результаты также позволили получить распределение толщины слоя кокса в радиантном змеевике, что свидетельствует об ускорении побочных процессов к концу процесса. Это связано с образованием значительного количества непредельных соединений. Установлено, что изменение основных параметров имеет два противоположных эффекта. Так, с повышением температуры и давления увеличивались как выходы целевых продуктов, так и скорость роста коксового слоя. Увеличение расхода сырья приводит к снижению обоих этих параметров.

### Ключевые слова:

Пиролиз, углеводородное сырье, нестационарный режим, математическая модель, бензиновая фракция.

### Введение

В настоящее время подавляющее большинство товаров народного потребления, а также средств производства изготовлены с применением различных полимерных материалов. Наиболее распространенными среди них являются: полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, а также многие другие. Для производства данных материалов применяются такие непредельные соединения, как этилен и пропилен. Наличие в них двойной связи обуславливает проведение с ними реакций полимеризации [1–3].

Таким образом, олефины в качестве сырья нефтехимической промышленности являются одним из важных факторов для роста производительных сил в целом. Поэтому необходимо как качественное улучшение, так и количественное: путем повышения выработки целевой продукции и обеспечением бесперебойной работы. Количественные и качественные показатели продукции напрямую зависят от состава пе-

рерабатываемого сырья, который, в свою очередь, определяет оптимальные технологические параметры установки производства олефинов.

Основным способом производства олефинов является пиролиз различного углеводородного сырья. Данный процесс является разложением углеводородов при высоких температурах без кислорода. Наиболее широкое применение в промышленной реализации пиролиза нашли трубчатые печи. Данный тип печей состоит чаще всего из двух взаимосвязанных секций. В верхней части расположена конвекционная секция, в которой осуществляется подача в аппарат углеводородного сырья, смешение его с водяным паром в змеевике, а также нагрев восходящими дымовыми газами. Полученная в результате этого смесь нагревается до температуры, требуемой для проведения химических превращений. Далее пароуглеводородная смесь по змеевику направляется в расположенную ниже секцию – радиантную. В данной секции тепло к змеевику и, следовательно, к реакционному

потоку передается за счет радиационной теплопередачи поглощением лучистого тепла, выделяющегося при сгорании в горелках топливного газа. Данный поток энергии, таким образом, способствует протеканию целевых реакций разложения. В радиантной секции при этом находится несколько параллельных змеевиков. Введение водяного пара в конвекционной секции необходимо для того, чтобы снизить парциальное давление углеводородов. Таким образом, поскольку реакционные процессы протекают в газовой фазе, снижаются скорости побочных реакций.

Эффективность проведения пиролиза в процессе эксплуатации печи постепенно снижается вследствие образования слоя кокса на внутренних стенках радиантного змеевика. Кокс является высокоуглеродистым веществом, отложения которого образуются в результате побочных реакций полимеризации и поликонденсации непредельных соединений. Отложения кокса создают зоны термического напряжения на поверхности змеевиков, что может привести к их прогару вследствие низкой теплопроводности кокса. Возникновения прогаров являются аварийной ситуацией, которая требует остановки работы аппарата на продолжительный срок и замены всего змеевика.

На сегодняшний день повышение эффективности печей пиролиза происходит по двум основным направлениям. Первое из них заключается в усовершенствовании технологического оформления установок пиролиза [4–12]. Таким образом проводится внедрение более эффективных элементов печи: горелок, футеровок, змеевиков. Также ведутся исследования механизмов физико-химических процессов, протекающих при пиролизе [13–15]. Иной подход состоит в разработке и применении различных моделей с целью поиска оптимальных технологических параметров [16–22].

Авторы исследования [23] представили общую модель производства легких олефинов. Представленная в статье модель описывает образование этилена, пропилена и 1,3-бутадиена в результате пиролиза на алканов и циклоалканов, взятых в различных соотношениях. Однако модель была основана на экспериментальных данных лабораторной установки с неподвижным слоем, а не на промышленной установке. Также опыты проводились на смесях из чистых алканов, а не на бензиновой фракции. В [23], как и в настоящей работе, представлены зависимости выходов этилена и пропилена от температуры. Однако в [23] рассматривался диапазон от 650 до 800 °С, тогда как в настоящей работе рассматриваются более высокие значения. Таким образом, к сравнению можно привести результаты из достаточно узкого диапазона. При 800 °С выход этилена находится в пределах от 45 до 50 % мас., а для пропилена составляет примерно 15 % мас., в то время как полученные с помощью настоящей модели значения составляют 4,5 и 2,38 % мас., соответственно. Существенная разница объясняется упомянутыми выше различиями в методологии.

В [24] А. Жонг и др. представили экспериментальное и кинетическое исследование пиролиза и окисле-

ния реальной легкой нефти и ее суррогатной смеси. В данном исследовании эксперименты проводились в реакторе со струйным смешением, а не в промышленной установке. Также авторы варьируют температуру в пределах от 750 °К (476 °С) до 1100 °К (826 °С), тогда как представленная в настоящей работе модель работает в гораздо более узком диапазоне, но с несколько большим максимальным значением – от 780 до 850 °С. Так, при 800 °С в модели Жонга и др. выход этилена составил  $5,2 \cdot 10^{-4}$  % мол. и  $7 \cdot 10^{-5}$  % мол. для пропилена, в то время как в представленной в настоящей работе модели данные значения составляют 0,159 и 0,061 % мол., соответственно. Более интересным различием является снижение выхода пропилена в диапазоне от 1025 до 1100 °К.

Существует ряд принципиальных проблем, осложняющих разработку модели. Основной из них является существенное увеличение объемов необходимых вычислений с ростом числа компонентов, представленных в системе. Во-первых, это связано с тем, что определение физико-химических параметров для каждого из них является нетривиальной задачей. Во-вторых, внесение очередного компонента в систему влечет за собой введение в схему превращений нескольких реакций. Другой проблемой является учет дополнительных эффектов взаимодействия между компонентами. Например, коэффициентов бинарного взаимодействия. Наконец, нельзя исключать возникновение проблем с проверкой адекватности модели, поскольку данные с существующих установок пиролиза, с которыми необходимо проводить сравнение, могут быть неполными или же представлять коммерческую тайну.

Цель исследования: разработка нестационарной модели пиролиза бензиновой фракции и использование ее в качестве инструмента прогнозирования состояния установки пиролиза с учетом изменения физико-химических параметров, состава сырья и толщины слоя кокса с течением астрономического времени. Помимо этого, законченная модель должна дать возможность более глубокого понимания процесса коксообразования и его отложения, в том числе распределения по длине змеевика и взаимодействия с материалом стенки.

Коксообразование протекает непрерывно, поэтому пиролиз является нестационарным процессом вследствие постоянно изменяющегося сечения змеевика. Подобное изменение непосредственно влияет на гидродинамический режим течения реакционного потока, на теплоперенос от сжигаемого топлива к данному потоку и, следовательно, на кинетические параметры реакций. Таким образом, существующие стационарные модели не подходят для задач прогнозирования и, следовательно, для оптимизации, поскольку в них не учитываются постоянно меняющиеся условия химического процесса. Представленная в настоящей работе модель учитывает накопленную толщину слоя кокса за определенный период времени. Подобные нестационарные модели пиролиза еще не были представлены даже в исследованиях мирового уровня. Кроме того, модель позволяет определять зависимо-

сти скорости роста коксового слоя от различных параметров технологического режима. То есть появляется возможность сформулировать стратегию оптимизации процесса.

#### Методы и материалы

Объектом исследования является процесс пиролиза бензиновой фракции, в течение которого изменяется состав сырья и термодинамические условия процесса.

Технологическая схема промышленной установки пиролиза, расположенной на одном из нефтехимических заводов России, представлена на рис. 1.

Углеводородное сырье подается в змеевик конвекционной секции печи, которая обозначена на рис. 1 синим цветом. В данной секции сырье испаряется, а

затем нагревается до температур примерно 800–870 °С восходящими из радиантной камеры снизу дымовыми газами. Для контроля температуры в конвекционной камере, а также полноты сгорания топлива в дымоходе установлена заслонка. В определенной точке конвекционного змеевика поток углеводородов смешивается с паром разбавления. Данное смешение производится для снижения парциального давления углеводородов. Таким образом, в радиантной секции снижаются скорости побочных реакций. В конвекционной секции также имеются экономайзер и пароперегреватель. Первый предназначен для нагрева питательной воды котла-утилизатора, а второй – для получения перегретого пара высокого давления.

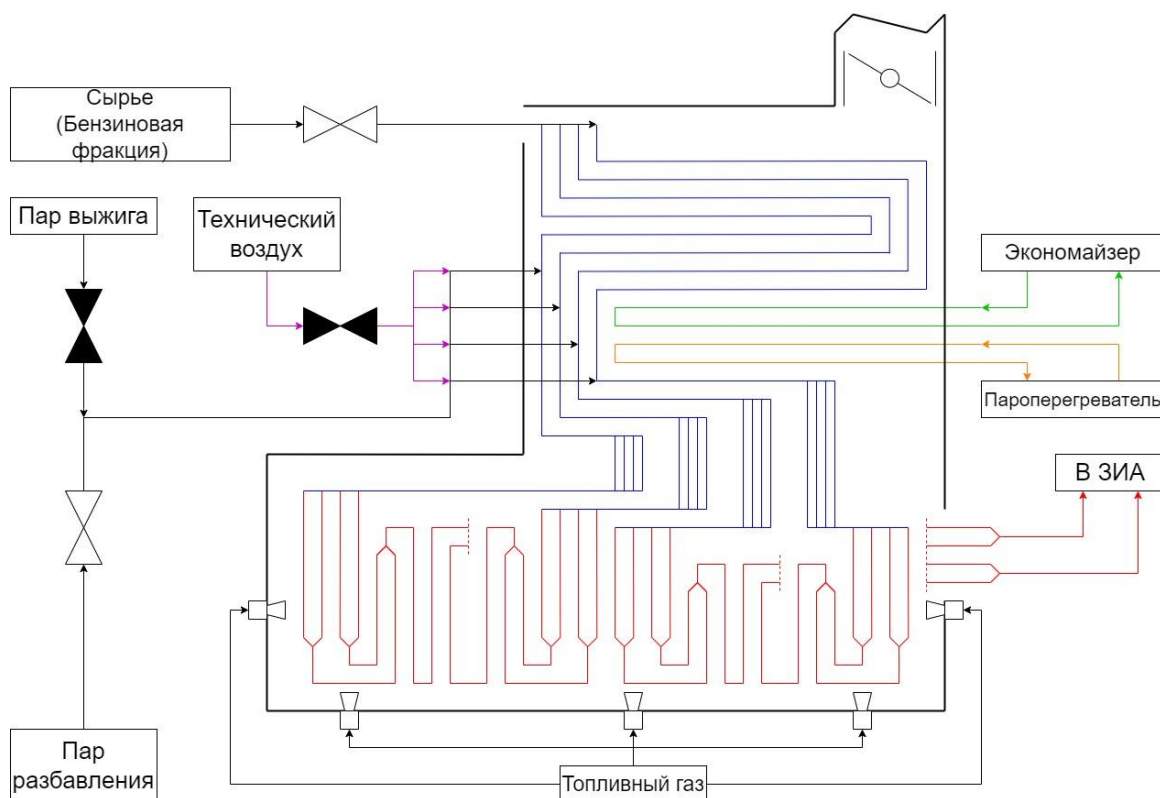


Рис. 1. Схема установки пиролиза  
Fig. 1. Scheme of the pyrolysis plant

Радиантная секция предназначена для проведения процесса пиролиза в змеевиках и снабжена боковыми и подовыми горелками, позволяющими нагревать змеевик со всех сторон. В радиантной секции находятся четыре параллельных радиантных вертикальных змеевика, расположенных в одной плоскости. Паросырьевая смесь поступает в радиантную секцию по четырем трубам с внутренним диаметром 0,0748 м и длиной 10,55 м. Далее потоки объединяются парно в два потока в трубах с внутренним диаметром 0,0998 м и длиной 12,64 м. Данные трубы соединяются в один поток в трубе с внутренним диаметром 0,1374 м и длиной 46,38 м. Потоки двух змеевиков на

выходе из печи также объединяются и поступают в закалочно-испарительный аппарат (ЗИА). Таким образом, из печи пиролиза выходят два потока пирогаза.

Модель основана на формализованной схеме реакций, протекающих при пиролизе бензиновой фракции в промышленных печах. Схема представлена на рис. 2.

При этом полная схема включает 172 реакции. В табл. 1 представлены кинетические параметры основных реакций. Большинство из них – это реакции крекинга алканов, образования алкенов из углеводородных радикалов, а также образование кокса.

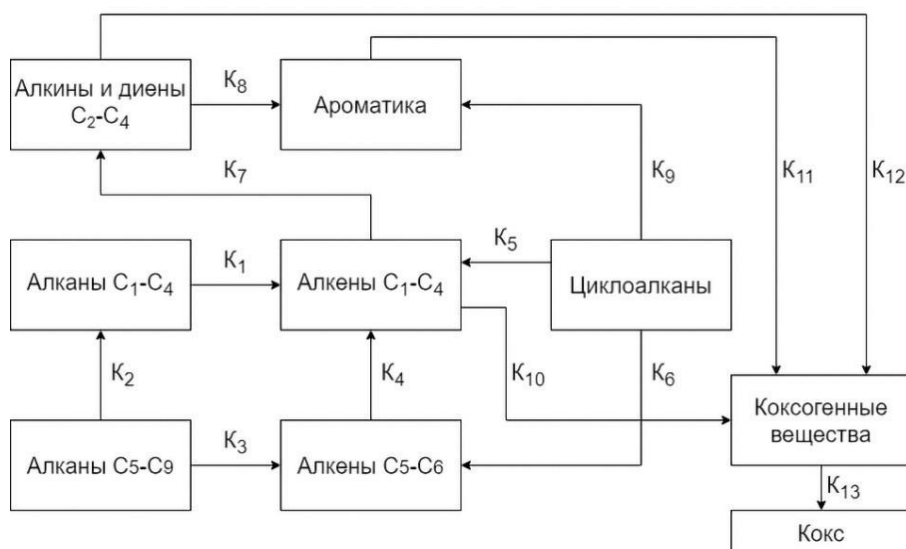


Рис. 2. Формализованная схема превращений

Fig. 2. Reactions scheme

Таблица 1. Кинетические параметры основных реакций

Table 1. Kinetic parameters of the main reactions

Реакция/Reaction	$E_a$ , кДж/моль kJ/mol	$K_0$ , $s^{-1}$ ( $s^{-1}$ )	Реакция/Reaction	$E_a$ , кДж/моль kJ/mol	$K_0$ , $s^{-1}$ ( $s^{-1}$ )
$C_2H_6 \rightarrow C_2H_3 \cdot$	360	$3,98 \cdot 10^{16}$	$C_5H_9 \cdot \rightarrow C_2H_4 + C_3H_5 \cdot$	112,9	$3,98 \cdot 10^{13}$
$C_3H_8 \rightarrow CH_3 \cdot + C_2H_5 \cdot$	343	$6,3 \cdot 10^{16}$	$C_2H_6 + H \cdot \rightarrow C_2H_5 \cdot + H_2$	41,4	$5,01 \cdot 10^{13}$
$n-C_4H_{10} \rightarrow 2C_2H_5 \cdot$ $n-C_4H_{10} \rightarrow 2C_2H_5 \cdot$	339	$6,3 \cdot 10^{16}$	$C_3H_8 + H \cdot \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + H_2$ $C_3H_8 + H \cdot \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + H_2$	40,1	$3,16 \cdot 10^{13}$
$n-C_4H_{10} \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + CH_3 \cdot$ $n-C_4H_{10} \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + CH_3 \cdot$	332	$5,01 \cdot 10^{16}$	$n-C_4H_{10} + H \cdot \rightarrow n-C_4H_9 \cdot + H_2$ $n-C_4H_{10} + H \cdot \rightarrow n-C_4H_9 \cdot + H_2$	37,2	$3,16 \cdot 10^{13}$
$изо-C_4H_{10} \rightarrow втор-C_3H_7 \cdot + CH_3 \cdot$ $iso-C_4H_{10} \rightarrow sec-C_3H_7 \cdot + CH_3 \cdot$	343,6	$6,3 \cdot 10^{16}$	$n-C_4H_{10} + H \cdot \rightarrow втор-C_4H_9 \cdot + H_2$ $n-C_4H_{10} + H \cdot \rightarrow sec-C_4H_9 \cdot + H_2$	30,5	$3,16 \cdot 10^{13}$
$n-C_5H_{12} \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + C_2H_5 \cdot$ $n-C_5H_{12} \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + C_2H_5 \cdot$	328,1	$2,51 \cdot 10^{16}$	$изо-C_4H_{10} + H \cdot \rightarrow iso-C_4H_9 \cdot + H_2$ $iso-C_4H_{10} + H \cdot \rightarrow iso-C_4H_9 \cdot + H_2$	40,1	$3,98 \cdot 10^{13}$
$изо-C_5H_{12} \rightarrow втор-C_3H_7 \cdot + C_2H_5 \cdot$ $iso-C_5H_{12} \rightarrow sec-C_3H_7 \cdot + C_2H_5 \cdot$	324	$5,01 \cdot 10^{16}$	$изо-C_4H_{10} + H \cdot \rightarrow трет-C_4H_9 \cdot + H_2$ $iso-C_4H_{10} + H \cdot \rightarrow tert-C_4H_9 \cdot + H_2$	25,1	$3,98 \cdot 10^{13}$
$C_4H_8 \cdot \rightarrow C_3H_5 \cdot + CH_3 \cdot$	309,3	$2 \cdot 10^{16}$	$C_2H_6 + CH_3 \cdot \rightarrow C_2H_5 \cdot + CH_4$	49,3	$7,94 \cdot 10^{11}$
$C_4H_6 \cdot \rightarrow 2C_2H_3 \cdot$	397,1	$1 \cdot 10^{15}$	$C_2H_3 \cdot + C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + C_2H_5 \cdot$	62,7	$1 \cdot 10^{12}$
$2 C_3H_6 \rightarrow C_3H_5 \cdot + втор-C_3H_7 \cdot$ $2 C_3H_6 \rightarrow C_3H_5 \cdot + sec-C_3H_7 \cdot$	259,2	$1 \cdot 10^{15}$	$C_3H_8 + CH_3 \cdot \rightarrow втор-C_3H_7 \cdot + CH_4$ $C_3H_8 + CH_3 \cdot \rightarrow sec-C_3H_7 \cdot + CH_4$	40,1	$6,3 \cdot 10^{11}$
$CH_4 \rightarrow CH_3 \cdot + H \cdot$	449,8	$6,3 \cdot 10^{16}$	$5C_2H_4 \rightarrow C_{10}H_8 + 12H \cdot$	461,1	$1,26 \cdot 10^9$
$n-C_6H_{14} \rightarrow 2n-C_3H_7 \cdot$ $n-C_6H_{14} \rightarrow 2n-C_3H_7 \cdot$	332,3	$5,01 \cdot 10^{15}$	$n-C_4H_{10} + CH_3 \cdot \rightarrow втор-C_4H_9 \cdot + CH_4$ $n-C_4H_{10} + CH_3 \cdot \rightarrow sec-C_4H_9 \cdot + CH_4$	38,4	$1,26 \cdot 10^{12}$
$n-C_6H_{14} \rightarrow n-C_4H_9 \cdot + C_2H_5 \cdot$ $n-C_6H_{14} \rightarrow n-C_4H_9 \cdot + C_2H_5 \cdot$	332,3	$1 \cdot 10^{16}$	$изо-C_4H_{10} + CH_3 \cdot \rightarrow iso-C_4H_9 \cdot + CH_4$ $iso-C_4H_{10} + CH_3 \cdot \rightarrow iso-C_4H_9 \cdot + CH_4$	45,1	$2,51 \cdot 10^{12}$
$2-M-C_5H_{11} \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + втор-C_3H_7 \cdot$ $2-M-C_5H_{11} \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + sec-C_3H_7 \cdot$	328,1	$1 \cdot 10^{16}$	$изо-C_4H_{10} + CH_3 \cdot \rightarrow трет-C_4H_9 \cdot + CH_4$ $iso-C_4H_{10} + CH_3 \cdot \rightarrow tert-C_4H_9 \cdot + CH_4$	28,4	$3,98 \cdot 10^{11}$
$3-M-C_5H_{11} \rightarrow C_2H_5 \cdot + втор-C_4H_9 \cdot$ $3-M-C_5H_{11} \rightarrow C_2H_5 \cdot + sec-C_4H_9 \cdot$	324	$1 \cdot 10^{16}$	$C_3H_8 + CH_3 \cdot \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + CH_4$ $C_3H_8 + CH_3 \cdot \rightarrow n-C_3H_7 \cdot + CH_4$	46	$1 \cdot 10^{12}$
$C_2H_5 \cdot \rightarrow C_2H_4 + H \cdot$	165,5	$7,94 \cdot 10^{13}$	$C_3H_5 \cdot + C_2H_6 \rightarrow C_3H_6 + C_2H_5 \cdot$	62,7	$1 \cdot 10^{12}$
$n-C_3H_7 \cdot \rightarrow C_2H_4 + CH_3 \cdot$ $n-C_3H_7 \cdot \rightarrow C_2H_4 + CH_3 \cdot$	140	$3,98 \cdot 10^{13}$	$C_3H_8 + C_3H_5 \cdot \rightarrow втор-C_3H_7 \cdot + C_3H_6$ $C_3H_8 + C_3H_5 \cdot \rightarrow sec-C_3H_7 \cdot + C_3H_6$	71	$2,51 \cdot 10^{11}$
$n-C_3H_7 \cdot \rightarrow C_3H_6 + H \cdot$ $n-C_3H_7 \cdot \rightarrow C_3H_6 + H \cdot$	140	$3,98 \cdot 10^{13}$	$n-C_5H_{12} + H \cdot \rightarrow n-C_5H_{11} \cdot + H_2$ $n-C_5H_{12} + H \cdot \rightarrow n-C_5H_{11} \cdot + H_2$	34,3	$6,3 \cdot 10^{13}$
$втор-C_3H_7 \cdot \rightarrow C_3H_6 + H \cdot$ $sec-C_3H_7 \cdot \rightarrow C_3H_6 + H \cdot$	172,6	$2 \cdot 10^{14}$	$n-C_5H_{12} + CH_3 \cdot \rightarrow n-C_5H_{11} \cdot + CH_4$ $n-C_5H_{12} + CH_3 \cdot \rightarrow n-C_5H_{11} \cdot + CH_4$	42,2	$3,98 \cdot 10^{12}$
$n-C_4H_9 \cdot \rightarrow C_2H_4 + C_2H_5 \cdot$ $n-C_4H_9 \cdot \rightarrow C_2H_4 + C_2H_5 \cdot$	136,7	$2,51 \cdot 10^{13}$	$n-C_4H_{10} + CH_3 \cdot \rightarrow n-C_4H_9 \cdot + CH_4$ $n-C_4H_{10} + CH_3 \cdot \rightarrow n-C_4H_9 \cdot + CH_4$	45,1	$1,26 \cdot 10^{12}$
$втор-C_4H_9 \cdot \rightarrow C_3H_6 + CH_3 \cdot$ $sec-C_4H_9 \cdot \rightarrow C_3H_6 + CH_3 \cdot$	137,9	$5,01 \cdot 10^{13}$	$трет-C_4H_9 \cdot \rightarrow iso-C_4H_8 + H \cdot$ $tert-C_4H_9 \cdot \rightarrow iso-C_4H_8 + H \cdot$	163	$3,98 \cdot 10^{13}$
$6C_3H_6 \rightarrow C_{18}H_{12} + 24H \cdot$	334,4	$2,51 \cdot 10^{10}$	$5C_4H_8 \cdot \rightarrow 2C_{10}H_8 + 22H \cdot$	26,3	$3,98 \cdot 10^{10}$
$n-C_5H_{11} \cdot \rightarrow C_2H_4 + n-C_3H_7 \cdot$ $n-C_5H_{11} \cdot \rightarrow C_2H_4 + n-C_3H_7 \cdot$	137,9	$3,98 \cdot 10^{13}$	$n-C_5H_{11} \cdot \rightarrow C_4H_8 \cdot + CH_3 \cdot$ $n-C_5H_{11} \cdot \rightarrow C_4H_8 \cdot + CH_3 \cdot$	137,9	$3,98 \cdot 10^{13}$
$n-C_5H_{11} \cdot \rightarrow C_3H_6 + C_2H_5 \cdot$ $n-C_5H_{11} \cdot \rightarrow C_3H_6 + C_2H_5 \cdot$	137,9	$3,98 \cdot 10^{13}$	$5изо-C_4H_8 \rightarrow 2C_{10}H_8 + 22H \cdot$ $5iso-C_4H_8 \rightarrow 2C_{10}H_8 + 22H \cdot$	309,3	$2,51 \cdot 10^{10}$
$5C_4H_8 \cdot \rightarrow 2C_{10}H_8 + 22H \cdot$	309,3	$3,98 \cdot 10^{10}$	$2C_{10}H_8 + 2C_2H_4 \rightarrow C_{24}H_{12} + 8H \cdot$	501,2	$6,3 \cdot 10^8$
$C_5H_9 \cdot \rightarrow C_4H_6 \cdot + CH_3 \cdot$	112,9	$3,98 \cdot 10^{13}$	$C_{18}H_{12} + 3C_2H_4 \rightarrow C_{24}H_{12} + 12H \cdot$	494,1	$5,01 \cdot 10^8$

В модели используется сырье, состав которого представлен в табл. 2. Тем не менее не все компоненты представлены здесь, а только основные, поскольку номенклатура веществ достаточно широка. Модель включает 60 компонентов: как молекул углеводородов, так и радикалов.

**Таблица 2.** Содержание основных компонентов в сырье  
**Table 2.** Main components content in the feedstock

Компонент Component	Концентрация, моль/л Concentration, mol/l
н-С <sub>4</sub> H <sub>10</sub> /n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,20
изо-С <sub>4</sub> H <sub>10</sub> /iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,04
н-С <sub>5</sub> H <sub>12</sub> /n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1,0
изо-С <sub>5</sub> H <sub>12</sub> /iso-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,16
н-С <sub>6</sub> H <sub>14</sub> /n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	3,60
СН <sub>3</sub> -СН(СН <sub>3</sub> )-С <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	1,78
С <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -СН(СН <sub>3</sub> )-С <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	1,08
1-С <sub>3</sub> H <sub>10</sub>	0,11
цикло-С <sub>6</sub> H <sub>12</sub> /cyclo-C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1,13
изо-С <sub>4</sub> H <sub>8</sub> /iso-C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0,20
цикло-С <sub>5</sub> H <sub>8</sub> /cyclo-C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	0,51

Основная идея модели состоит в том, что концентрации компонентов изменяются в результате химических реакций, протекающих во времени, а также по всей длине трубы печи пиролиза, что описывается дифференциальным уравнением (1):

$$\frac{dc}{dt} + \frac{dc}{dl} \cdot u = \sum W, \quad (1)$$

где  $\sum W$  – сумма скоростей реакций для конкретного компонента, моль/(л·с).

Данное уравнение с помощью метода конечных разностей преобразуется в явное выражение концентрации конкретного компонента в некоторой точке координатной плоскости длины змеевика и астрономического времени, как показано в уравнениях (2), (3):

$$\frac{c_{i-1,j+1} - c_{i-1,j}}{\Delta t} + \frac{c_{i,j} - c_{i-1,j}}{\Delta l} \cdot u_{i-1,j} = \sum W, \quad (2)$$

$$c_{i,j} = \left( \frac{\Delta l}{u_{i-1,j}} \right) \cdot \left( \sum W_{i,j} - \frac{1}{\Delta t} \cdot c_{i-1,j+1} + \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{u_{i-1,j}}{\Delta l} \right) \cdot c_{i-1,j} \right), \quad (3)$$

где  $u_{i,j}$  – линейная скорость потока, м/с;  $\Delta l$  – шаг интегриации по длине змеевика, м;  $\Delta t$  – шаг интегриации по времени, с.

Следует отметить, что в данной статье здесь и далее  $i$  обозначает координату по оси длины змеевика, а  $j$  – по оси времени.

Сама модель включает 172 реакции, каждая из которых происходит в каждой точке длины и координаты времени. Таким образом, для каждой реакции константа скорости рассчитывается по уравнению Аррениуса (4):

$$K_{y,i,j} = K_{0,y} \cdot \left( \frac{P_{i,j}^2}{T} \right) \cdot \exp\left(\frac{-E_{a,y}}{RT}\right), \quad y \in \{0, \dots, 172\}, \quad (4)$$

где  $K_{y,i,j}$  – константа скорости реакции  $y$ , моль/(л·с);  $P_{i,j}$  – давление в заданной точке, Па;  $E_{a,y}$  – энергия активации реакции  $y$ , кДж/моль;  $T$  – температура, К.

Для расчета изменения концентрации того или иного компонента необходимо суммировать скорости

реакций, в которых участвует этот компонент. Для этого каждую из данных скоростей умножают на соответствующий стехиометрический коэффициент, который компонент имеет в данной реакции, как показано в уравнении (5). То есть, если компонент является реагентом, коэффициент имеет положительное значение, в противном случае – отрицательное.

$$\sum W_{x,i,j} = \sum_{y=0}^{172} a_{x,y} \cdot K_{y,i,j} \cdot \prod C_k^{\beta_{k,y}}, \quad (5)$$

где  $a_{x,y}$  – стехиометрический коэффициент компонента в рассматриваемой точке;  $\beta_{k,y}$  – стехиометрические коэффициенты всех компонентов в данной реакции.

В настоящей работе  $x$  обозначает компонент, а  $y$  – номер реакции. Для уравнения выше  $k$  также является обозначением компонента, но он используется для записи уравнения скорости реакции и таким образом отличается от  $x$ .

Уравнение (1) модифицируется для высокомолекулярных полимерных соединений, являющихся прекурсорами кокса, как показано в уравнении (6):

$$\frac{dc}{dt} + \frac{dc}{dl} \cdot u = \sum W - R_S, \quad (6)$$

где  $R_S$  – скорость осаждения полимерных соединений, моль/л·с.

В данной формуле скорость осаждения имеет знак «минус», так как молекулы удаляются из реакционного потока по направлению к стенке змеевика.

Сама скорость осаждения рассчитывается по следующей формуле:

$$R_S = \frac{0.023}{(0.25 \cdot \pi)^{0.8}} \cdot \left( \frac{G^{0.8} \cdot \mu^{0.2} \cdot \omega_n}{D^{1.8} \cdot Sc^{\frac{2}{3}} \cdot M_{CM}} \right), \quad (7)$$

где  $Sc$  – число Шмидта, варьирующееся зачастую от 1,2 до 1,3;  $\omega_n$  – массовая доля прекурсоров кокса в данной части объема змеевика;  $\mu$  – вязкость, Па·с;  $M_{CM}$  – средняя молярная масса потока, кг/моль;  $G$  – массовый расход, кг/ч.

Модифицированное уравнение (3) имеет вид, показанный в уравнении (8):

$$c_{i,j} = \left( \frac{\Delta l}{u_{i-1,j}} \right) \cdot \left( \sum W - R_S - \frac{1}{\Delta t} \cdot c_{i-1,j+1} + \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{u_{i-1,j}}{\Delta l} \right) \cdot c_{i-1,j} \right). \quad (8)$$

Для расчета концентрации компонента необходимо знать его концентрацию на предыдущем шаге итерации по оси длины в тот же момент времени, а также на том же шаге по оси длины, но в следующий момент времени, т. е. следующий шаг итерации по оси времени.

Масса кокса в заданной точке рассчитывается по уравнению (9):

$$m_{\text{кокс } i,j} = m_{\text{кокс } i,j-1} + R_S \cdot \Delta t \cdot \Delta l \cdot \pi \cdot M_{\text{кокс}} \cdot \left( \frac{D}{2} \right)^2, \quad (9)$$

где  $m_{\text{кокс } i,j}$  – масса кокса в заданной точке, г;  $M_{\text{кокс}}$  – молярная масса кокса, г/моль;  $D$  – внутренний диаметр участка змеевика, м.

Необходимо отметить, что скорость осаждения  $R_S$  в уравнении (9) имеет размерность моль/м<sup>3</sup>·с.

Таким образом, толщина слоя кокса рассчитывается как:

$$\delta_{i,j} = \frac{D}{2} - \frac{d_{i,j}}{2} = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \frac{m_{\text{кокс } i,j}}{\rho_{\text{кокс}}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot \Delta t}}, \quad (10)$$

где  $\delta_{i,j}$  – толщина слоя кокса, м;  $d_{i,j}$  – диаметр змеевика с учетом отложения кокса, м;  $\rho_{\text{кокс}}$  – плотность кокса, г/м<sup>3</sup>.

Слой кокса уменьшает эффективный диаметр змеевика печи, на величину, рассчитанную по уравнению (10), оказывая таким образом прямое влияние на профиль давления обрабатываемого потока углеводородов. Данное явление может быть описано следующим уравнением:

$$P_{i,j} = P_{i-1,j} - \frac{\lambda \cdot u_{i-1,j}^2 \cdot \rho_{\text{см}} \cdot \Delta t}{2(D-2\delta_{i,j})}, \quad (11)$$

где  $\rho_{\text{см}}$  – плотность углеводородной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент трения;

Для уравнения (11) скорость потока рассчитывается по уравнению (12):

$$u_{i-1,j} = \frac{G}{\rho_{\text{см}}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot (D-2\delta_{i,j})^2}, \quad (12)$$

где  $G$  – массовый расход, кг/ч.

Необходимо заметить, что значение массового расхода в уравнении выше такое же, как и для уравнения (7).

За счет динамической природы давления на протяжении всего процесса, согласно уравнению (11), константы скорости изменяются как по длине, так и по времени. Поэтому для всех компонентов системы кинетика соответствующих реакций различается от одной итерации к другой, что обуславливает нестационарность модели.

Однако следует отметить, что поскольку основной целью создания модели является регулирование технологических параметров печи и оптимизация процесса в условиях постоянно меняющегося состава сырья, для ускорения расчетов принимается допущение о том, что процесс является изотермическим.

#### Оценка отложения кокса

Для верификации модели необходимо сравнить скорость роста слоя кокса, рассчитанную по модели, с реальной. Однако точных или приблизительных данных о величине данного параметра нет. Поэтому нет иного способа, кроме как оценить его с помощью соответствующих технических данных, полученных с одного из нефтехимических заводов. Для этого были выбраны два подхода. Первый заключается в оценке с помощью данных о количестве технического воздуха, направленного в змеевик для выжигания кокса. При этом на основании литературных источников для оценки сделано предположение, что кокс в основном состоит из коронена [25]. Коронен является полициклическим ароматическим углеводородом, структура которого приведена на рис. 3.

Другой метод заключается в расчете толщины слоя по значению перепада давления. Таким способом можно рассчитать толщину кокса, поскольку известна также геометрическая конфигурация змеевика и состав потока сырья.

При выжиге кокса протекает следующая реакция:

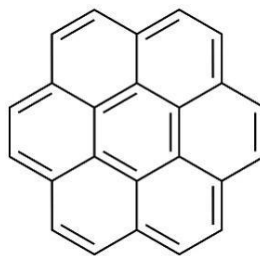
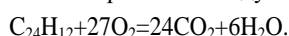


Рис. 3. Структура коронена

Fig. 3. Coronene structure

Технический воздух подавался в течение 50 часов в режиме, представленном в табл. 3.

Таблица 3. Расход технического воздуха, направленного для выжигания кокса

Table 3. Technical air flow rate for coke burnout

Длительность периода, ч Duration, h	Расход, кг/ч Flow rate, kg/h
2	250
16	100
6	500
2	630
28	150
Итого воздуха направлено, кг/Total air fed, kg	10560

Представленные в таблице данные являются режимом для одного из четырех потоков.

Следовательно, общая масса направленного для выжигания кокса технического воздуха составила 10560 кг. В техническом воздухе содержание кислорода составляет 1,5 % мас. Следовательно, масса кислорода, участвующего в реакции горения кокса, составляет 158,4 кг, что соответствует 4950 моль. Это, согласно стехиометрии реакции выше, означает, что в течение межрегенерационного цикла в змеевике накопилось 183,3 моль кокса, что соответствует 55 кг кокса. Поскольку плотность коронена составляет 1350 кг/м<sup>3</sup>, объем образовавшегося кокса 0,0407 м<sup>3</sup>.

Было сделано допущение об одинаковой толщине кокса в каждой секции. Таким образом, объем образовавшегося кокса связан с геометрическими параметрами змеевика как:

$$V_{\text{кокс}} = \pi \cdot \sum n \cdot L \cdot \left( \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - \delta\right)^2 \right), \quad (13)$$

где  $n$  – количество параллельных труб в секции змеевика,  $L$  – длина секции, м;  $D$  – диаметр секции, м;  $V_{\text{кокс}}$  – объем накопленного кокса во всем змеевике, м<sup>3</sup>;  $\delta$  – оцениваемая толщина слоя кокса, м.

По уравнению (13) было рассчитано, что толщина слоя кокса составила 1,08 мм. Таким образом, результатом оценки по первому способу является то, что в течение 42 суток скорость роста слоя кокса составила 0,0259 мм в сутки, или  $3 \cdot 10^{-7}$  мм/с.

Для оценки роста слоя кокса по второму способу также были использованы упомянутые выше данные с одного из нефтехимических заводов России. Согласно данным из журналов АСУТП (автоматизированной системы управления технологическим процессом) в течение года процесс выжигания проводился в среднем при давлении сырья на входе в змеевик пи-

ролиза 0,485 МПа, тогда как среднее давление на выходе из змеевика в тот же момент составляло 0,095 МПа. Таким образом, выжиг кокса проводился при перепаде давления 0,39 МПа.

Предполагалось, что перепад давлений обусловлен потерями вследствие возникновения силы трения между стенками змеевика, а также слоем накопившегося кокса и реакционным потоком. Данный перепад можно описать следующей формулой:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d_e} \cdot \frac{u^2 \rho_{\text{см}}}{2} = 0,39 \text{ МПа}, \quad (14)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления, МПа;  $\lambda$  – коэффициент трения;  $d_e$  – эффективный диаметр змеевика с учетом слоя кокса,  $(D - \delta)$ , м.

Значение коэффициента трения в уравнении (14) составляет 0,0373.

Плотность потока рассчитывается по уравнению Менделеева–Клапейрона, как показано в уравнении (15). При этом в данном расчете в качестве давления принималось среднее арифметическое от значений давления на входе и выходе в конце межрегенерационного цикла, указанных выше:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{P \cdot M_{\text{см}}}{RT} = \frac{0,29 \cdot 10^6 \cdot 52,4 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 1098} = 1,664 \text{ кг/м}^3. \quad (15)$$

Однако невозможно сказать, каковы значения давления и линейной скорости в местах соединений секций змеевика с разным внутренним диаметром, поскольку технологией не предусмотрены соответствующие датчики. Поэтому для дальнейшей оценки расчеты проводились для змеевика постоянного сечения, оказывающего такое же гидродинамическое сопротивление, как и действующий змеевик. Для данной цели был принят диаметр змеевика 100 мм.

Согласно технической документации на печь пиролиза, площадь теплообмена змеевика радиантной секции составляет 176 м<sup>2</sup>, что является суммарным значением для всех четырех параллельных змеевиков. Таким образом, длина змеевика постоянного сечения составляет:

$$L = \frac{S_{\text{т/о}}}{\pi D} = \frac{\left(\frac{176}{4}\right)}{\pi \cdot 0,1} = 140,13 \text{ м},$$

где  $S_{\text{т/о}}$  – площадь теплообмена одного змеевика, м<sup>2</sup>.

Значение линейной скорости потока в данном гипотетическом змеевике составляет:

$$u = \frac{G}{S_c \cdot \rho_{\text{см}} \cdot 3600} = \frac{4400}{0,00785 \cdot 1,664 \cdot 3600} = 93,57 \text{ м/с},$$

где  $S_c$  – площадь поперечного сечения змеевика, м<sup>2</sup>;  $G$  – массовый расход, кг/ч.

Эффективный диаметр змеевика в конце межрегенерационного цикла определяется как:

$$d_e = \lambda \frac{L}{\Delta P} \frac{\omega^2 \rho}{2} = 0,0373 \frac{140,13}{0,39 \cdot 10^6} \frac{93,57^2 \cdot 1,664}{2} = 0,09763 \text{ м} = 97,63 \text{ мм}.$$

Согласно данному методу оценки, толщина слоя кокса, накопившегося за 42 дня, составляет 1,186 мм. Таким образом, скорость роста слоя составляет 0,0282 мм в сутки, или  $3,27 \cdot 10^{-7}$  мм/с.

Поскольку межрегенерационный цикл составляет 42 суток, то модели необходимо будет произвести большое количество вычислений. Если шаг по оси времени равен 1 секунде, а по оси длины он составляет 1 см, системе предстоит вычислить около 25,5 миллиардов точек на координатной плоскости. Таким образом, было введено еще одно упрощение: полученные скорости роста рассчитывались для одной секунды, так как для такого расчета скорости роста слоя необходимо обработать около 14000 точек. Следовательно, экспериментальные скорости роста, которые были оценены по указанным техническим данным обоими методами, составляют  $3 \cdot 10^{-7}$  и  $3,27 \cdot 10^{-7}$  мм/с соответственно.

Скорость роста, полученная с помощью модели, составляет  $3,12 \cdot 10^{-7}$  мм в секунду. Результат расчетов по модели показан на рис. 4. С учетом предыдущего предположения о скорости роста слоя кокса накопленная толщина за сутки по результатам, полученным с помощью модели, составила 0,027 мм. Ошибка при оценке скорости роста слоя кокса через стехиометрию реакции выжига составляет 3,85 %, тогда как для метода оценки через перепад давления ошибка составляет 4,81 %.

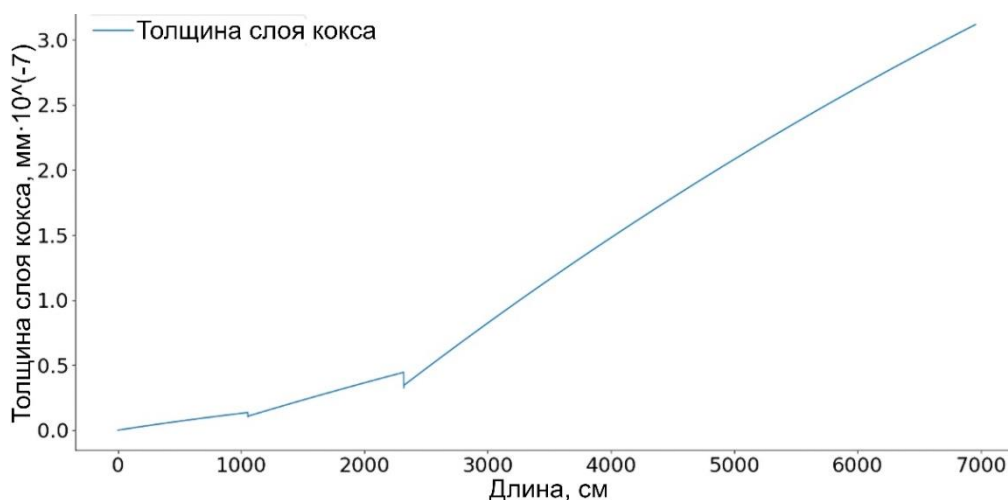


Рис. 4. Слой кокса, образовавшийся за 1 секунду

Fig. 4. Coke layer grown within 1 second

Несмотря на то, что оба значения ошибок не превышают 5 %, необходимо отметить следующее. Во-первых, представленные методы оценки не являются точными по самой своей природе, поскольку существенным является уже допущение о постоянстве роста слоя кокса. Другим серьезным упрощением в оценке скорости роста является применение в расчетах усредненных значений давления и, соответственно, плотности в силу отсутствия соответствующих

экспериментальных данных. Во-вторых, несмотря на то, что коронен присутствует в составе пиролизного кокса, невозможно точно сказать, является ли данное вещество основным компонентом твердых отложений, поскольку кокс имеет не монокомпонентный состав, а отложения образованы коксом трех типов: игольчатым, слоистым и аморфным. Предполагаемые структуры данных типов кокса приведены на рис. 5.

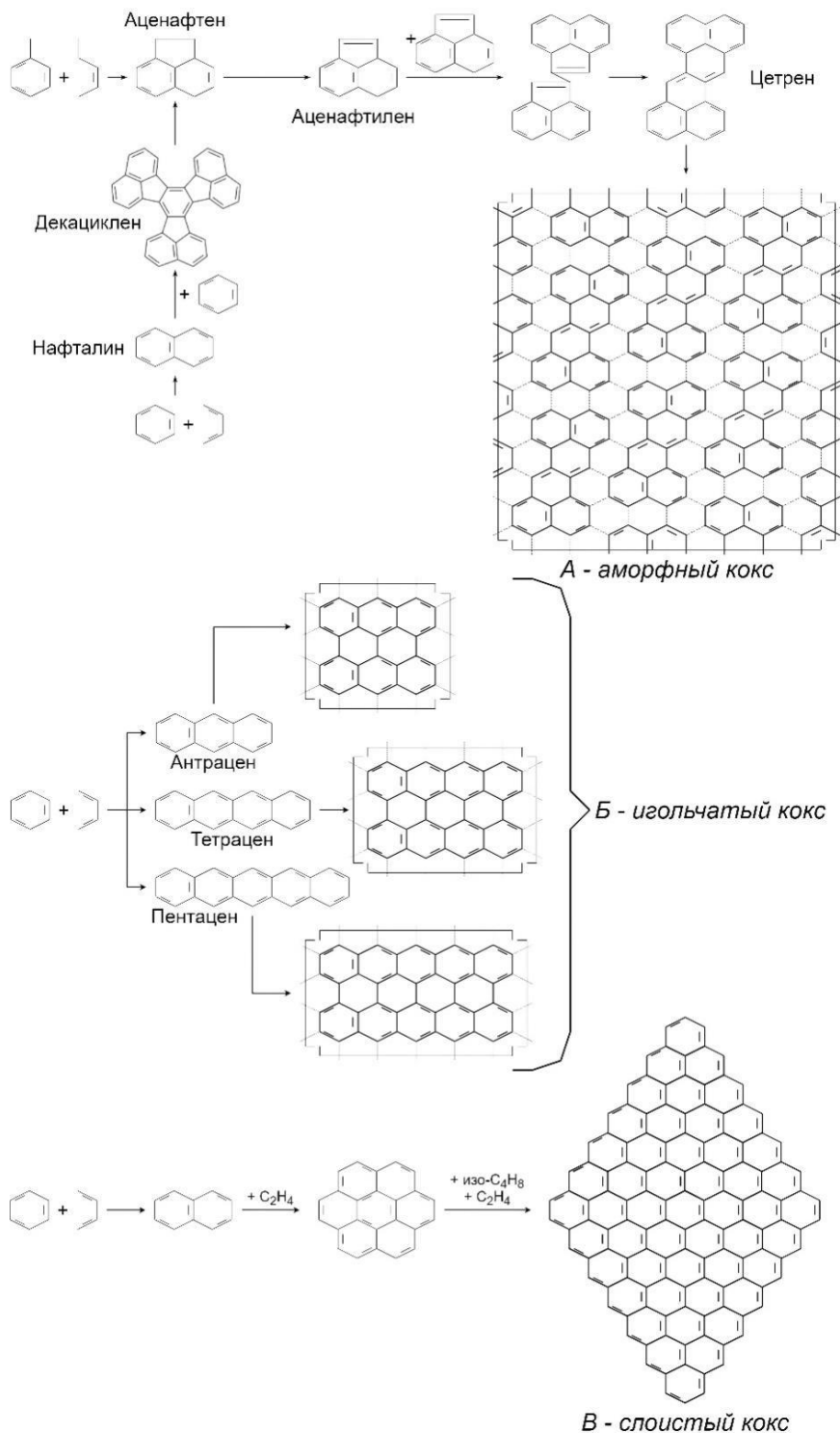


Рис. 5. Возможные структуры трех типов кокса  
 Fig. 5. Possible structures of three types of coke



### Результаты и обсуждение

Согласно данным с того же нефтехимического предприятия, массовая доля этилена в выходящем из печи потоке составляет 26 %, тогда как для пропилена – 14 %. Среднее значение давления в течение одного года на выходе из змеевика составляет примерно 0,09 МПа, а средневзвешенная молекулярная масса выходящего потока – 36 г/моль. Таким образом, его плотность составляет:

$$\rho_{\text{вых}} = \frac{P_{\text{вых}} \cdot M_{\text{вых}}}{RT} = \frac{0,09 \cdot 10^6 \cdot 36 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 1098} = 0,355 \text{ кг/м}^3,$$

где  $\rho_{\text{вых}}$  – плотность потока на выходе из змеевика пиролиза, кг/м<sup>3</sup>;  $P_{\text{вых}}$  – давление потока на выходе из змеевика, Па;  $M_{\text{вых}}$  – молярная масса потока на выходе из змеевика пиролиза, кг/моль.

Данные массовые доли конвертированы в молярные концентрации по уравнению (16):

$$C_{\text{комп}} = \frac{\rho_{\text{вых}} \cdot \omega_{\text{комп}}}{M_{\text{комп}}} \cdot 1000, \quad (16)$$

где  $C_{\text{комп}}$  – концентрация компонента, моль/л;  $\omega_{\text{комп}}$  – массовая доля компонента;  $M_{\text{комп}}$  – молярная масса компонента, кг/моль.

Таким образом, концентрации этилена и пропилена составляют 3,3 и 1,2 моль/л, соответственно, при следующих условиях. Начальное давление на входе в змеевик 0,5 МПа, температура 825 °С, массовый расход сырья 4400 кг/ч. Расчетные выходные концентрации составили 3,4 моль/л для этилена и 1,3 моль/л для пропилена. Данные результаты соответствуют ошибке 3 и 8 %, соответственно. Динамика концентраций представлена на рис. 6.

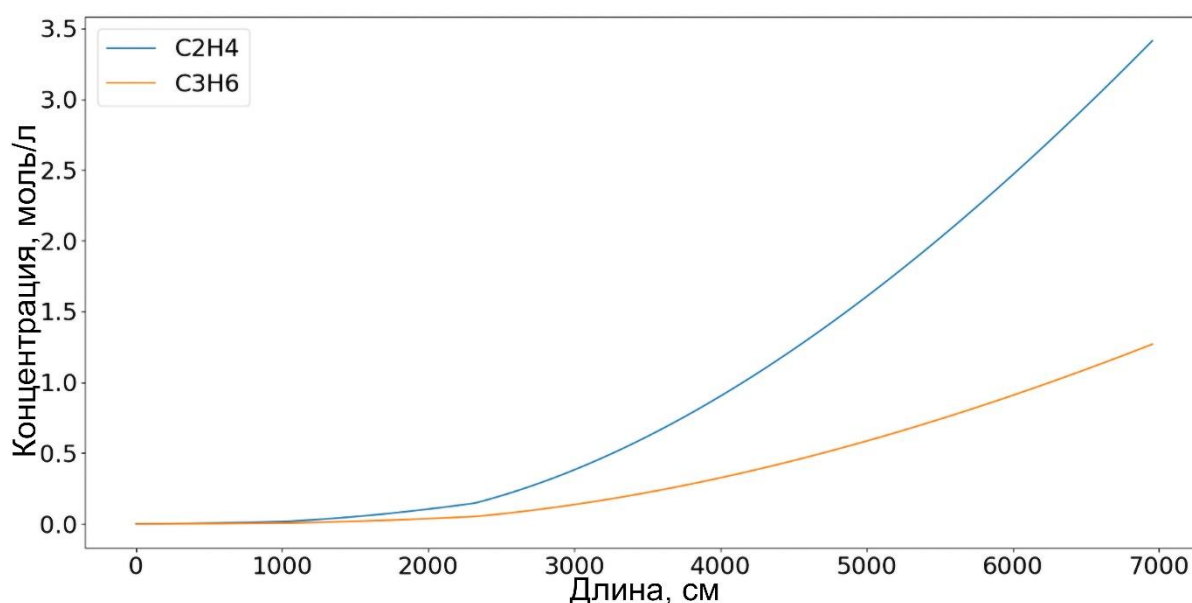


Рис. 6. Динамика этилена и пропилена  
 Fig. 6. Ethylene and propylene dynamics

Оба целевых продукта имеют схожие профили изменения концентраций. Начальным этапом процесса является образование радикалов вследствие распада исходных молекул углеводородов. Образующиеся в результате радикалы далее вступают в различные реакции. Основной среди них является распад самих радикалов по связи между двумя атомами углерода, находящимися в β-положении относительно углерода с неспаренным электроном. В результате происходит образование алкена и радикала с меньшей массой. Другим типом целевых реакций являются реакции замещения: в результате взаимодействия радикала и насыщенного углеводорода происходит отрыв протона от последнего и присоединение его к первому. В силу условий проведения процесса для радикалов, имеющих связь между углеродами в β-положении относительно атома с неспаренным электроном, то есть, фактически с числом атомов углерода больше трех, гораздо более вероятен путь распада, описанный выше. То есть в реакции замещения вступают метилрадикалы и этилрадикалы, а также атомы водорода. В

результате происходит образование метана, этана или молекулы водорода и радикала, достаточно большого для распада. Таким образом, процесс образования целевых алкенов является результатом цепных реакций распада и замещения, имеющих высокую скорость вследствие высоких температур.

Таким образом, концентрация протонов и радикалов достигает некоторой критической точки, после чего скорости образования этилена и пропилена значительно возрастают. Исходя из данных, полученных с помощью представленной модели, данная точка, или же некоторая область, находится примерно в 22 метрах от входа в змеевик пиролиза. Данное явление иллюстрируется графиком на рис. 5. На начальном этапе процесса профили концентраций этилена и пропилена имеют характеристику, близкую к линейной, тогда как при прохождении критической точки данная характеристика уже ближе к экспоненциальной.

Кроме того, данная динамика коррелирует с таковой для роста слоя кокса по длине змеевика, так как предполагается, что алкены являются реагентами для

образования прекурсоров кокса. Можно предположить, что значительное увеличение содержания этилена и пропилена в реакционном потоке приводит к соответствующему росту слоя кокса. Поэтому ожидается, что данный слой будет толще ближе к выходу из змеевика.

С помощью модели получены зависимости скорости роста слоя кокса и выходных концентраций эти-

лена и пропилена от давления потока сырья на входе в радиантный змеевик, температуры процесса и расхода сырья.

Допустимая температура в радиантной секции составляет от 780 до 850 °С согласно технической документации установки пиролиза.

Зависимости скорости роста слоя кокса и выходов алкенов представлены на рис. 7, 8, соответственно.

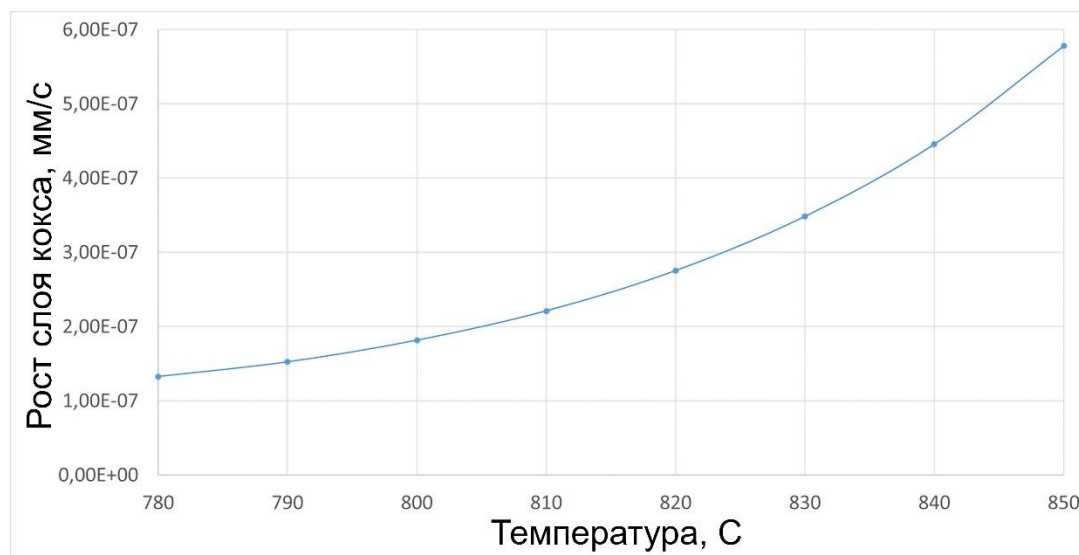


Рис. 7. Зависимость роста слоя кокса от температуры процесса

Fig. 7. Dependence of coke layer thickness growth rate on process temperature

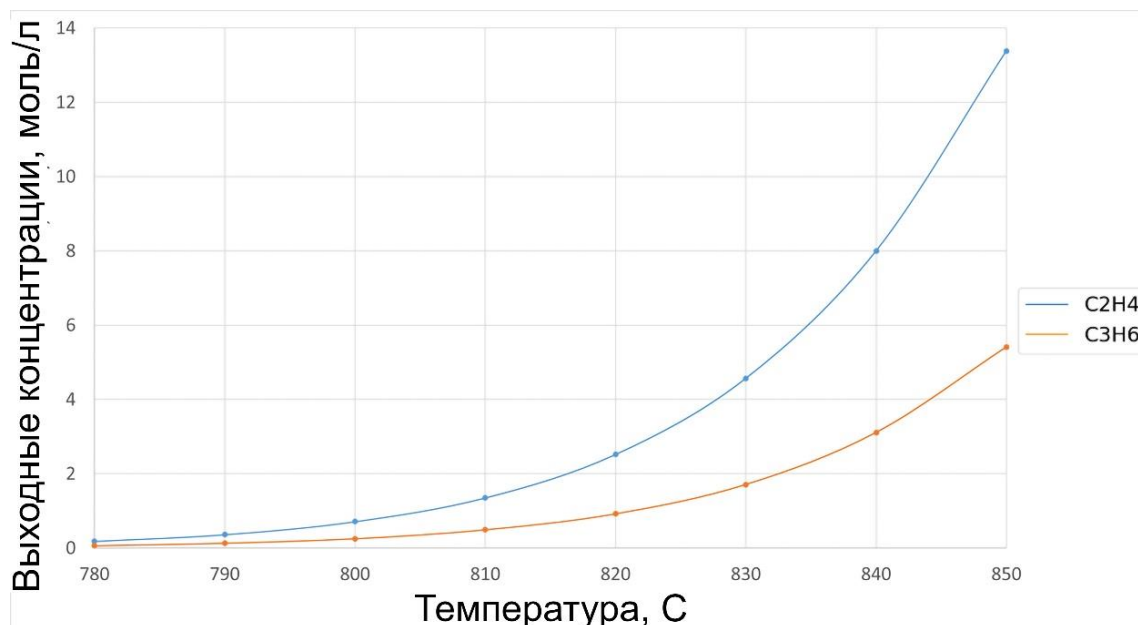


Рис. 8. Зависимость выходов этилена и пропилена от температуры процесса

Fig. 8. Dependence of ethylene and propylene yields on process temperature

Выходы целевых алкенов, а также скорость роста слоя кокса значительно увеличиваются при более высоких значениях температуры. При минимально допустимом значении предельные концентрации этилена и пропилена на выходе составляют 0,18 и 0,06 моль/л, соответственно. При максимально возможной температуре эти значения составляют уже

1,38 и 0,54 моль/л, соответственно. С другой стороны, при 780 °С скорость роста коксового слоя наименьшая –  $1,33 \cdot 10^{-7}$  мм/с, а при 850 °С этот показатель выше в 4,36 раза –  $5,78 \cdot 10^{-7}$  мм/с.

Таким образом, повышение температуры значительно ускоряет как целевые, так и побочные процессы. Однако необходимо отметить, что неограничен-

ное повышение температуры невозможно из-за ограничений, накладываемых свойствами материалов радиантного змеевика, так как вероятность прогара змеевика значительно возрастает с повышением температуры. Данная вероятность еще выше в местах отложения кокса, так как кокс имеет низкую теплопроводность. Поэтому, согласно рис. 7, количество подобных областей увеличивается, что приводит к большему количеству прогаров.

Повышение температуры также означает увеличение расхода топливного газа и нагнетания на компрессоре подачи топливного газа в горелки реактора.

Установлены зависимости выходов целевых продуктов и роста слоя кокса от давления сырьевого потока на входе в змеевик. Они показаны на рис. 9, 10, соответственно. Величина давления на входе изменяется в пределах от 0,3 до 0,75 МПа согласно той же технической документации.

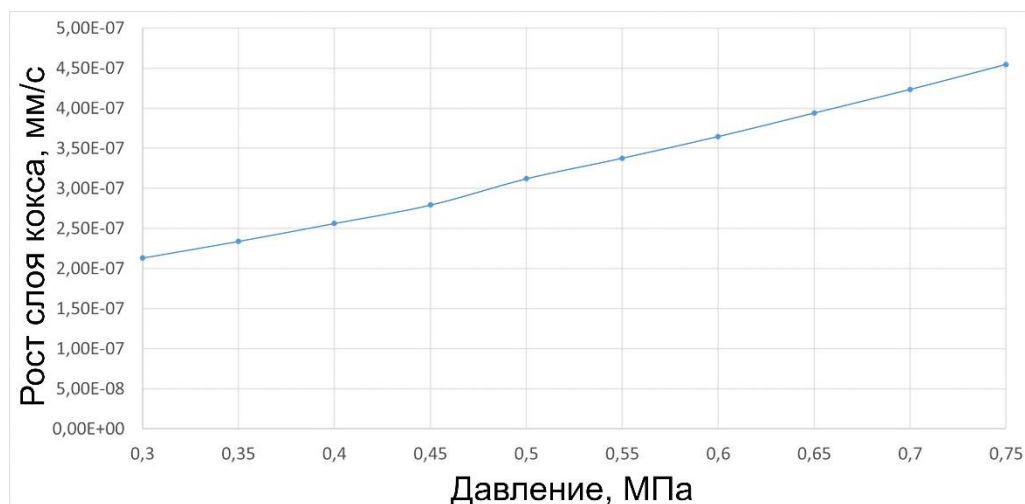


Рис. 9. Зависимость скорости роста слоя кокса от давления сырья на входе в змеевик

Fig. 9. Dependence of coke layer thickness growth rate on inlet pressure

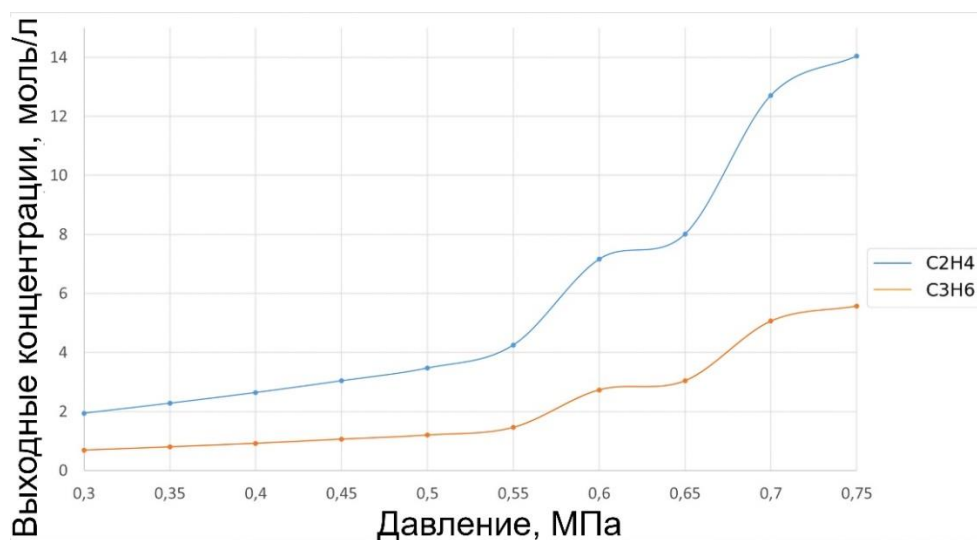


Рис. 10. Зависимость выходов этилена и пропилена от давления на входе в змеевик

Fig. 10. Dependence of ethylene and propylene yields on inlet pressure

Как и при повышении температуры, при повышении давления ускоряются как целевые, так и побочные процессы. При минимальном давлении 0,3 МПа концентрации этилена и пропилена составляют 1,94 и 0,69 моль/л, соответственно. Рост скорости кокса минимален при данном значении давления –  $2,13 \cdot 10^{-7}$  мм/с. При максимально возможном давлении 0,75 МПа концентрация этилена составляет 14,04 моль/л, а для пропилена – 5,57 моль/л. Скорость роста кокса при этом в 2,13 раза выше, чем при минимальном значении давления –  $4,55 \cdot 10^{-7}$  мм/с.

Зависимость роста слоя кокса носит линейный характер во всем диапазоне значений давления, однако зависимость выходных концентраций целевых компонентов имеет невысокий угловой коэффициент вначале, который значительно увеличивается при значениях выше 0,55 МПа. Данное увеличение неравномерно в диапазоне от указанного значения до максимального.

Тем не менее поддержание высоких давлений также невозможно, так как это означает увеличение скорости подачи сырья, что увеличивает затраты или требует установки новых, более мощных насосов.

Таким образом, существуют две противоположные тенденции для зависимостей от давления и температуры. С увеличением значений обоих данных параметров, соответственно, растут выходы целевых алкенов. Но при этом увеличивается скорость роста слоя кокса, что снижает межрегенерационный цикл установки пиролиза, что противоречит цели данной работы.

Установлены также зависимости выходов и роста слоя кокса от массового расхода сырья. Они показаны на рис. 11, 12, соответственно. Значение расхода варьируется в пределах от 3500 до 5000 кг/ч в соответствии с предоставленной технической документацией. По данным АСУ ТП данный параметр поддерживается в пределах от 4400 до 4600 кг/ч в нормальном режиме.

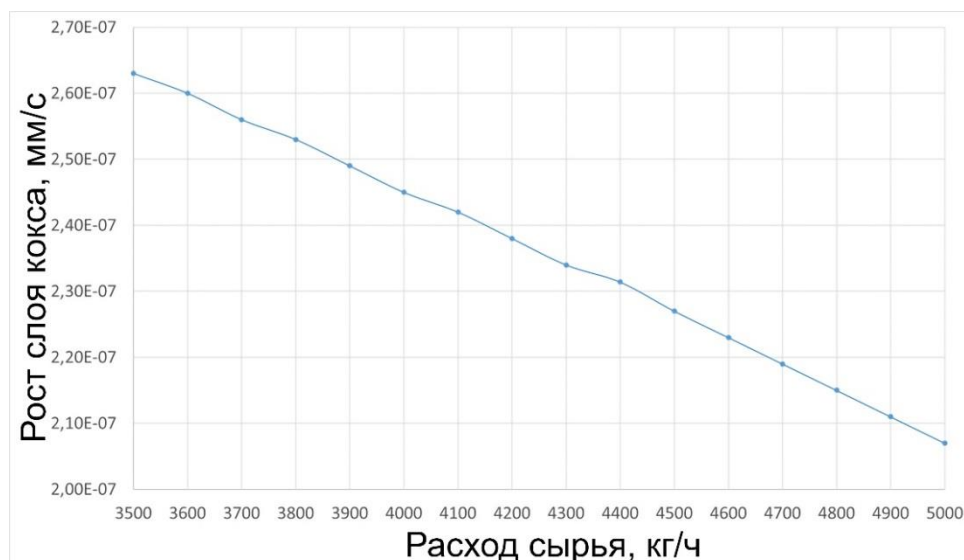


Рис. 11. Зависимость скорости роста слоя кокса от массового расхода сырья

Fig. 11. Dependence of coke layer thickness growth rate on feedstock mass flow rate

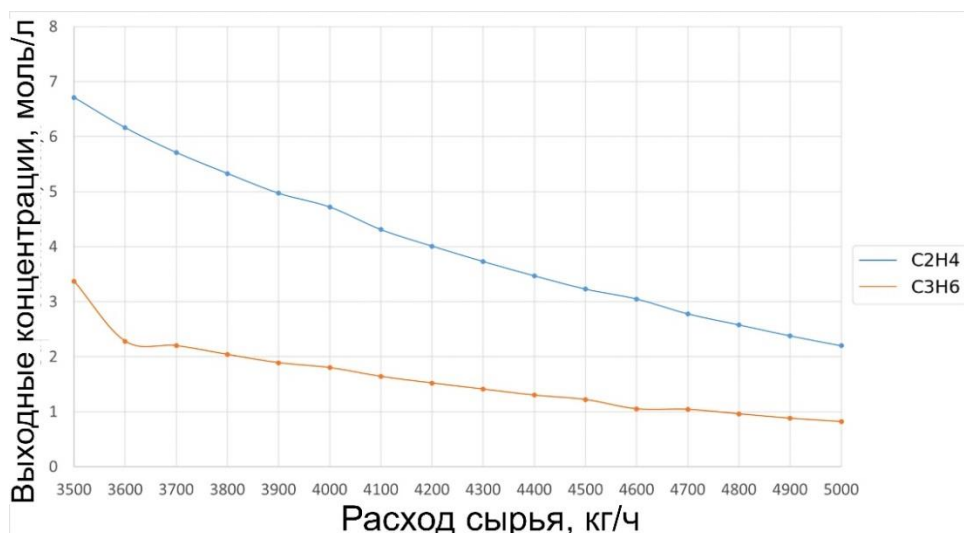


Рис. 12. Зависимость выходов этилена и пропилена от массового расхода сырья

Fig. 12. Dependence of ethylene and propylene yields on feedstock mass flow rate

При минимально допустимом расходе концентрации этилена и пропилена на выходе составляют 6,71 и 3,37 моль/л, соответственно, тогда как при максимальном данные значения меньше и составляют 2,2 и 0,82 моль/л, соответственно. Данное снижение можно объяснить тем, что вследствие увеличения линейной скорости потока, соответственно, уменьшается время контакта. Уменьшение времени контакта в свою очередь приводит к тому, что химические процессы в змеевике протекают не в полной мере.

Тем не менее снижается и скорость роста слоя кокса. При минимальном расходе его значение составляет  $2,63 \cdot 10^{-7}$  мм/с, а при максимальном в 1,27 раза меньше –  $2,07 \cdot 10^{-7}$  мм/с. Это связано с образованием недостаточного количества олефинов вследствие указанных выше причин.

Таким образом, увеличение массового расхода вызывает уменьшение значений обоих параметров.

В данном случае также существуют две противоположные тенденции, как и для зависимостей от дав-

ления и температуры: снижение массового расхода сырья приводит к увеличению выходов, однако это также способствует образованию кокса. Кроме того, с уменьшением расхода сырья пиролиза уменьшается и расходы воды в ЗИА. Соответственно падает производительность по пару, что недопустимо, так как другие участки производства рассчитаны на потребление определенного количества пара для нормальной работы.

В результате можно предположить, что наибольшее влияние на систему оказывает температура процесса, поскольку она является его основной движущей силой. Зависимость от нее имеет экспоненциальный характер.

Давление влияет на систему в диапазоне более высоких значений, поддерживать которые менее выгодно. Можно сказать, что существуют две разные линейные зависимости от давления в двух диапазонах для выходов этилена и пропилена. Первый находится в области более низких давлений, где рост выходов олефинов стабилен и невысок. В то время как во втором рост имеет более неравномерную характеристику, однако тренд здесь по-прежнему линейный с более выраженным наклоном. Зависимость скорости роста слоя кокса имеет линейную характеристику во всем диапазоне.

Массовый расход сырья имеет устойчивое линейное распределение как для выхода целевых продуктов, так и для скорости роста слоя.

Несмотря на то, что было проведено множество исследований, связанных с самим процессом пиролиза, исследований промышленного пиролиза бензиновой фракции, предоставляющих профили концентраций интермедиатов и конечных продуктов, немного. Кроме того, в большинстве работ отсутствуют сведения об образовании кокса и его осаждении, что является новизной настоящей статьи.

#### Выводы

Представленное в данной статье исследование нестационарного процесса пиролиза позволило получить ряд результатов.

1. Определен темп роста толщины слоя кокса в процессе пиролиза с помощью разработанной модели с учетом технологических параметров и состава сырья. Расчетное значение скорости составляет

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khasanov R.G., Murtazin F.R. Prediction of yields of lower olefins during pyrolysis of hydrocarbon feedstock // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. – 2020. – V. 56. – P. 341–346.
2. Influence of feedstock, catalyst, pyrolysis and hydrotreatment temperature on the composition of upgraded oils from intermediate pyrolysis / C. Boscagli, M. Tomasi Morgano, K. Raffelt, H. Leibold, J.D. Grunwaldt // *Biomass and Bioenergy*. – 2018. – V. 116. – P. 236–248.
3. Study on the NO removal efficiency of the lignite pyrolysis coke catalyst by selective catalytic oxidation method / L. Zhang, X. Wen, Z. Ma, L. Zhang, X. Sha, H. He, T. Zeng, Y. Wang, J. Chen // *PLoS One*. – 2017. – V. 12. – P. 1–15.
4. Numerical study of ethylene bubble rising in benzene flow / E. Khlebnikova, A. Vorobev, E. Ivashkina, T. Lubimova // *Petroleum and Coal*. – 2018. – V. 60. – P. 24–27.

$3,12 \cdot 10^{-7}$  мм в секунду. Оценка скорости роста слоя кокса на действующей установке показала, что погрешность модели составляет менее 5 %.

2. Результаты моделирования позволили получить распределение толщины слоя кокса в змеевике печи пиролиза, что свидетельствует о том, что она неравномерна и значительно увеличивается ближе к выходу реакционного потока из змеевика. Это, в свою очередь, говорит о значительном ускорении побочных процессов, что связано с образованием в результате первичных реакций достаточного количества непредельных углеводородов, в основном ароматических соединений и алкенов.
3. Установлено, что изменение основных параметров процесса (температура, давление и массовый расход) имеет два противоположных друг другу эффекта. При повышении температуры и давления в пределах разрешенных технической документацией значений увеличивались как выходы целевых алкенов, так и скорость роста слоя кокса. Стоит отметить, что повышение температуры оказывает на эти выходы значительно большее влияние, чем любой другой параметр. С другой стороны, увеличение массового расхода сырья приводит к снижению как выхода целевых алкенов, так и скорости роста коксового слоя. Поэтому для оптимизации процесса необходимо одновременно варьировать несколько параметров для получения наборов многомерных векторов. Также можно задать дополнительные критерии оптимизации. Например, таким критерием может быть соотношение выхода этилена и пропилена, так как этилен является гораздо более предпочтительным продуктом производства олефинов.

В будущем планируется включить в систему моделирование теплообмена. При этом будут учитываться скорость и величина теплопередачи через стенки трубы и слой кокса. Таким образом, моделирование неравномерного нагрева потока повысит адекватность модели.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-79-00233, Государственного Задания РФ «Наука», проект FSWW-2023-0008 и в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.*

5. Effects of large pore zeolite additions in the catalytic pyrolysis catalyst on the light olefins production / X. Li, B. Shen, Q. Guo, J. Gao // *Catalysis Today* – 2007. – V. 125. – P. 270–277.
6. Recent advances on catalysts for improving hydrocarbon compounds in bio-oil of biomass catalytic pyrolysis / P.R. Bhoi, A.S. Ouedraogo, V. Soloiu, R. Quirino // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – V. 121. – P. 1–13.
7. Investigation of coke deposition during the pyrolysis of hydrocarbon / Z. Reniun, L. Qiangkun, L. Huicai, N. Fenghui // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 1987. – V. 26. – P. 2528–2532.
8. Catalytic pyrolysis of pinewood over ZSM-5 and CaO for aromatic hydrocarbon: analytical Py-GC/MS study / M.M. Rahman, M. Chai, M. Sarker, N. Nishu, R. Liu // *Journal of the Energy Institute* – 2020. – V. 93. – P. 425–435.
9. Ratnasari D.K., Nahil M.A., Williams P.T. Catalytic pyrolysis of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* – 2017. – V. 124. – P. 631–637.

10. Fau G., Gascoïn N., Steelant J. Hydrocarbon pyrolysis with a methane focus: a review on the catalytic effect and the coke production // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2014. – V. 108. – P. 1–11.
11. Yang S.I., Wu M.S., Wu C.Y. Application of biomass fast pyrolysis part I: pyrolysis characteristics and products // *Energy*. – 2014. – V. 66. – P. 162–171.
12. Zhao S., Zhang Y., Su Y. Experimental investigation of rice straw oxidative pyrolysis process in a hot-rod reactor // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2019. – V. 142. – P. 1–7.
13. Influence of secondary reactions on heat transfer process during pyrolysis of hydrocarbon fuel under supercritical conditions / K. Gong, Y. Cao, Y. Feng, S. Liu, J. Qin // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – V. 159. – P. 1–10.
14. High olefin yield in pyrolysis of heavier hydrocarbon liquids using microwave as heat supplier / X. Jing, Y. Zhao, H. Wen, Z. Xu // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – P. 2052–2062.
15. Life cycle optimization for sustainable design and operations of hydrocarbon biorefinery via fast pyrolysis, hydrotreating and hydrocracking / B.H. Gebreslassie, M. Slivinsky, B. Wang, F. You // *Computers and Chemical Engineering*. – 2013. – V. 50. – P. 71–91.
16. A multi-wavelength speciation framework for high-temperature hydrocarbon pyrolysis / N.H. Pinkowski, Y. Ding, S.E. Johnson, Y. Wang, T.C. Parise, D.F. Davidson, R.K. Hanson // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2019. – V. 225. – P. 180–205.
17. Kinetics and modeling of supercritical pyrolysis of endothermic hydrocarbon fuels in regenerative cooling channels / Z. Li, H. Wang, K. Jing, L. Wang, Y. Li, X. Zhang, G. Liu // *Chemical Engineering Science*. – 2019. – V. 207. – P. 202–214.
18. Numerical study on the influences of heat and mass transfers on the pyrolysis of hydrocarbon fuel in mini-channel / Y. Feng, Y. Jiang, X. Li, S. Zhang, J. Qin, Y. Cao, H. Huang // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – V. 199. – P. 650–658.
19. Savage P.E. Mechanisms and kinetics models for hydrocarbon pyrolysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2000. – V. 54. – P. 109–126.
20. Mathematical modeling of the unsteady hydrocarbon pyrolysis process / F.A. Samedov, A.Y. Morozov, N.A. Samoilov, T.R. Prosochkina // *Petroleum Chemistry*. – 2019. – V. 59. – P. 151–159.
21. Co-pyrolysis behavior of coal slime and Chinese medicine residue by TG-FTIR-MS with principal component analysis and artificial neural network model / W. Zhou, Q. Lin, C. Wang, H. Bi, C. Jiang, J. Tian, Y. Liu, Z. Ni, H. Sun // *Combustion Science and Technology*. – 2021. – V. 193. – P. 2242–2253.
22. Stochastic reactor-based fuel bed model for grate furnaces / C. Netzer, T. Li, L. Seidel, F. Mauß, T. Lovås // *Energy Fuels*. – 2020. – V. 34. – P. 16599–16612.
23. Empirical modeling of normal/cyclo-alkanes pyrolysis to produce light olefins / X. Hou, B. Chen, Zh. Ma, J. Zhang, Yu. Ning, D. Zhang, L. Zhao, Yuan E., T. Cui // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2022. – V. 42. – P. 389–398.
24. Experimental and kinetic study on the pyrolysis and oxidation of isopentane in a jet-stirred reactor / A. Zhong, Z. Qiu, X. Li, Z. Huang, D. Han // *Combustion and Flame*. – 2022. – V. 235. – P. 1–16.
25. Мухина Т.Н., Барабанов Н.Л., Бабаш С.Е. Пиролиз углеводородного сырья. – М.: Химия, 1987. – 240 с.

Поступила: 14.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 23.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Бунаев А.А.**, аспирант отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Долганов И.М.**, кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Долганова И.О.**, кандидат технических наук, научный сотрудник отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Юрьев Е.М.**, кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 66.092-977

## UNSTEADY-STATE SIMULATION OF GASOLINE FRACTION PYROLYSIS

**Aiur A. Bunaev<sup>1</sup>,**  
aab70@tpu.ru

**Igor M. Dolganov<sup>1</sup>,**  
dolganovim@tpu.ru

**Irena O. Dolganova<sup>1</sup>,**  
dolganovaio@tpu.ru

**Egor M. Yuriev<sup>1</sup>,**  
emyu@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need of alkenes production increase as well as deepening understanding of the coke formation. The direction of petrochemical complex development and increase of pyrolysis efficiency is resources-saving, minimizing the volume of operations cost and the probability of occurrence of accidents.

**The main aim** of the research is to develop a mathematical model for gasoline fraction pyrolysis, which will consider coke formation and its effect on the kinetic, hydrodynamic and thermodynamic components of the process.

**Object** of the research is gasoline fraction pyrolysis process; dynamic of hydrocarbon stream composition during the process and coke formation side process.

**Methods.** The methodological basis of the research is the system analysis and the method of mathematical modeling. In addition, quantum-chemical methods are used to calculate the thermodynamic and kinetic parameters of target and side chemical reactions occurring during the processing of hydrocarbon raw materials, and electron-structural methods based on the density functional theory; methods of computational fluid dynamics for the study of flow regimes and the deposition of coke particles on the walls of the coil; developed experimental methods for determining the optimal consumption of hydrocarbon raw materials and steam, predicting the duration of the inter-regeneration cycle of the pyrolysis furnace.

**Results.** A non-stationary model of gasoline fraction pyrolysis was created to describe the coking side process along the length of the pyrolysis tube and over time. With the model, the rate of coke layer formation was calculated considering the technological parameters and the composition of feedstock. The calculated rate is  $3,12 \cdot 10^{-7}$  mm per second. The results also made it possible to obtain the thickness distribution of the coke layer in the radiant coil, which indicates the acceleration of side processes towards the end of the process. This is due to formation of a significant amount of unsaturated compounds. It was found that changing the main parameters has two opposite effects. Thus, with an increase in temperature and pressure, both the yields of target products and the growth rate of the coke layer increased. An increase in the consumption of raw materials leads to a decrease in both of these parameters.

**Key words:**

Pyrolysis, hydrocarbon feedstock, unsteady-state, mathematical model, gasoline fraction.

The work was supported by the Russian Science Foundation Grant no. 21-79-00233, State task of the RF «Nauka», project FSWW-2023-0008 and carried out within the framework of the TPU Competitiveness Improvement Program.

**REFERENCES**

1. Khasanov R.G., Murtazin F.R. Prediction of Yields of Lower Olefins during Pyrolysis of Hydrocarbon Feedstock. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2020, vol. 56, pp. 341–346.
2. Boscagli C., Tomasi Morgano M., Raffelt K., Leibold H., Grunwaldt J.D. Influence of feedstock, catalyst, pyrolysis and hydrotreatment temperature on the composition of upgraded oils from intermediate pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 116, pp. 236–248.
3. Zhang L., Wen X., Ma Z., Zhang L., Sha X., He H., Zeng T., Wang Y., Chen J. Study on the NO removal efficiency of the lignite pyrolysis coke catalyst by selective catalytic oxidation method. *PLoS One*, 2017, vol. 12, pp. 1–15.
4. Khlebnikova E., Vorobev A., Ivashkina E., Lubimova T. Numerical study of ethylene bubble rising in benzene flow. *Petroleum and Coal*, 2018, vol. 60, pp. 24–27.
5. Li X., Shen B., Guo Q., Gao J. Effects of Large Pore Zeolite Additions in the Catalytic Pyrolysis Catalyst on the Light Olefins Production. *Catalysis Today*, 2007, vol. 125, pp. 270–277.
6. Bhoi P.R., Ouedraogo A.S., Solorio V., Quirino R. Recent Advances on Catalysts for Improving Hydrocarbon Compounds in Bio-Oil of Biomass Catalytic Pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 121, pp. 1–13.
7. Reniun Z., Qiangkun L., Huicai L., Fenghui N. Investigation of Coke Deposition during the Pyrolysis of Hydrocarbon. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1987, vol. 26, pp. 2528–2532.
8. Rahman M.M., Chai M., Sarker M., Nishu N., Liu R. Catalytic pyrolysis of pinewood over ZSM-5 and CaO for aromatic hydrocarbon: analytical Py-GC/MS study. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 425–435.
9. Ratnasari D.K., Nahil M.A., Williams P.T. Catalytic pyrolysis of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, vol. 124, pp. 631–637.
10. Fau G., Gascoin N., Steelant J. Hydrocarbon pyrolysis with a methane focus: a review on the catalytic effect and the coke production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, vol. 108, pp. 1–11.
11. Yang S.I., Wu M.S., Wu C.Y. Application of biomass fast pyrolysis part I: pyrolysis characteristics and products. *Energy*, 2014, vol. 66, pp. 162–171.
12. Zhao S., Zhang Y., Su Y. Experimental investigation of rice straw oxidative pyrolysis process in a hot-rod reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2019, vol. 142, pp. 1–7.

13. Gong K., Cao Y., Feng Y., Liu S., Qin J. Influence of secondary reactions on heat transfer process during pyrolysis of hydrocarbon fuel under supercritical conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 159, pp. 1–10.
14. Jing X., Zhao Y., Wen H., Xu High Z. Olefin yield in pyrolysis of heavier hydrocarbon liquids using microwave as heat supplier. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, pp. 2052–2062.
15. Gebreslassie B.H., Slivinsky M., Wang B., You F. Life cycle optimization for sustainable design and operations of hydrocarbon biorefinery via fast pyrolysis. *Hydrotreating and Hydrocracking. Computers and Chemical Engineering*, 2013, vol. 50, pp. 71–91.
16. Pinkowski N.H., Ding Y., Johnson S.E., Wang Y., Parise T.C., Davidson D.F., Hanson R.K. A Multi-Wavelength Speciation Framework for High-Temperature Hydrocarbon Pyrolysis. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, vol. 225, pp. 180–205.
17. Li Z., Wang H., Jing K., Wang L., Li Y., Zhang X., Liu G. Kinetics and modeling of supercritical pyrolysis of endothermic hydrocarbon fuels in regenerative cooling channels. *Chemical Engineering Science*, 2019, vol. 207, pp. 202–214.
18. Feng Y., Jiang Y., Li X., Zhang S., Qin J., Cao Y., Huang H. Numerical study on the influences of heat and mass transfers on the pyrolysis of hydrocarbon fuel in mini-channel. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 199, pp. 650–658.
19. Savage P.E. Mechanisms and kinetics models for hydrocarbon pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2000, vol. 54, pp. 109–126.
20. Samedov F.A., Morozov A.Y., Samoilo N.A., Prosochkina T.R. Mathematical modeling of the unsteady hydrocarbon pyrolysis process. *Petroleum Chemistry*, 2019, vol. 59, pp. 151–159.
21. Zhou W., Lin Q., Wang C., Bi H., Jiang C., Tian J., Liu Y., Ni Z., Sun H. Co-pyrolysis behavior of coal slime and Chinese medicine residue by TG-FTIR-MS with principal component analysis and artificial neural network model. *Combustion Science and Technology*, 2021, vol. 193, pp. 2242–2253.
22. Netzer C., Li T., Seidel L., Mauß F., Løvås T. Stochastic reactor-based fuel bed model for grate furnaces. *Energy Fuels*, 2020, vol. 34, pp. 16599–16612.
23. Hou X., Chen B., Ma Zh., Zhang J., Ning Yu., Zhang D., Zhao L., Yuan E., Cui T. Empirical modeling of normal/cyclo-alkanes pyrolysis to produce light olefins. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, vol. 42, pp. 389–398.
24. Zhong A., Qiu Z., Li X., Huang Z., Han D. Experimental and kinetic study on the pyrolysis and oxidation of isopentane in a jet-stirred reactor. *Combustion and Flame*, 2022, vol. 235, pp. 1–16.
25. Mukhina T.N., Barabanov N.L., Babash S.E. *Piroliz uglevodorodnogo syrva* [Pyrolysis of hydrocarbon feedstock]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 240 p.

Received: 14 November 2022.

Reviewed: 23 January 2023.

#### Information about the authors

**Aiur A. Bunaev**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Igor M. Dolganov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Irena O. Dolganova**, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Egor M. Yuriev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.



УДК631.4:504.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ МЕТОДОМ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ДАЛДЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ, СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)

Гололобова Анна Григорьевна<sup>1</sup>,  
nuta0687@mail.ru

<sup>1</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,  
Россия, 677000, г. Якутск, пр. Ленина, 39.

**Актуальность.** В настоящее время промышленная деятельность, процессы которой приводят к ухудшению условий окружающей среды, приобретает все большие масштабы. В связи с чем необходимы проекты и мероприятия для снижения ущерба окружающей среде и восстановления нарушенных земель, которые основаны на предварительных исследованиях свойств почв, содержания и распределения микроэлементов и тяжелых металлов в условиях техногенеза.

**Цель:** определить закономерности пространственного распределения микроэлементов и источники их поступления в поверхностный слой почв на территории промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината с помощью инструментов многомерного статистического анализа.

**Объекты:** доминирующие типы почв северо-таежных ландшафтов Северо-Западной Якутии.

**Методы:** потенциометрический, колориметрический, атомно-абсорбционный, статистические методы (описательный, анализ нормального распределения, факторный анализ – методом главных компонент, пространственный).

**Результаты.** Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почв исследуемой территории распределяются в следующем порядке убывания:  $Zn > Ni > Mn > Cr > Co > Pb > Cd > As$ . Концентрации элементов  $Pb$ ,  $Ni$ ,  $Cd$ ,  $Co$ ,  $Cr$ ,  $Zn$  и  $As$  в поверхностном слое почв исследуемой территории не имеют нормального распределения, за исключением  $Mn$ . Выявлены три фактора, объясняющих дисперсию содержания микроэлементов и тяжелых металлов в почвах территории северо-таежных ландшафтов Северо-Западной Якутии. Первый фактор заметно влияет на распределение  $Co$ ,  $Cr$ ,  $Ni$  и  $Zn$ , второй – на  $Cd$ , третий – на  $As$  и  $Mn$ . Определены основные источники и очаги загрязнения. На содержание  $Co$ ,  $Cr$  и  $Ni$  в поверхностном слое почвы оказывают воздействие карьер кимберлитовой трубки «Удачный» и хвостохранилище № 1, на  $Zn$  – селитяная территория г. Удачный, на  $As$  – полигон высокоминерализованных рассолов.

### Ключевые слова:

микроэлементы, тяжелые металлы, подвижные формы, загрязнение почв, кимберлитовое поле, многомерный статистический анализ, пространственное распределение, Якутия.

### Введение

В экосистемах различного масштаба все компоненты связаны между собой потоками вещества и энергии, что обеспечивает цикличность процессов, устойчивость экосистем во времени и высокое качество природных сред. Однако эти же самые процессы способствуют и распространению материальных загрязнителей со всеми вытекающими для экосистем последствиями. Влияние антропогенных факторов может приводить к нарушению естественных потоков и перераспределению химических элементов в компонентах окружающей среды [1–4]. Горнодобывающая деятельность является основным источником попадания тяжелых металлов в окружающую среду [5–7]. А антропогенные процессы, приводящие к загрязнению окружающей среды, протекают быстрее природных [8].

Однако именно почва является едва ли не самой уязвимой геосферой с точки зрения техногенного воздействия. Почвы служат основным поглотителем загрязняющих веществ в наземной экосистеме. Наиболее сильные негативные изменения в результате интенсивной хозяйственной деятельности испытывают почвы промышленных регионов [9], к которым относится Республика Саха (Якутия). Якутия – самый крупный субъект Российской Федерации, который является уникальной территорией по разнообразию, количеству и качеству полезных ископаемых. Всего по Республике

Саха (Якутия) учитывается 2116 месторождений полезных ископаемых по 59 видам минерального и углеводородного сырья [10], которые обуславливают развитие различных видов промышленности. В связи с этим Якутия отличается потенциально высоким уровнем загрязнения почвенного покрова и уничтожением плодородного слоя земли за счет аккумуляции токсичных веществ, в том числе тяжелых металлов. В настоящее время уже имеются участки промышленных предприятий с чрезвычайно опасной эколого-геохимической ситуацией [11, 12], проблемами накопленного экологического ущерба [13], трансформацией естественного ландшафта [14–16] и др.

Для снижения ущерба окружающей среде, наносимого промышленными предприятиями, необходимы проекты и мероприятия, направленные на восстановление нарушенных земель. Они должны быть основаны на предварительных исследованиях свойств почв, содержания микроэлементов и тяжелых металлов, и их связи с окружающей средой [17]. Определение уровня загрязнения и оценка пространственной изменчивости концентрации тяжелых металлов в верхнем слое почвы необходимы для лучшего понимания сложных взаимосвязей почвенных процессов [18].

С быстрым развитием компьютерных технологий и различных статистических методов анализа они становятся одним из важнейших инструментов для изучения проблем геохимии окружающей среды. Это

связано с пространственной неоднородностью почвы и распределением тяжелых металлов по таким ковариатам, как ее характеристики, влияющие на процесс загрязнения. Следовательно, методы многомерного анализа позволят определить уязвимые зоны, на которых должны быть сосредоточены основные усилия по мониторингу и рекультивации.

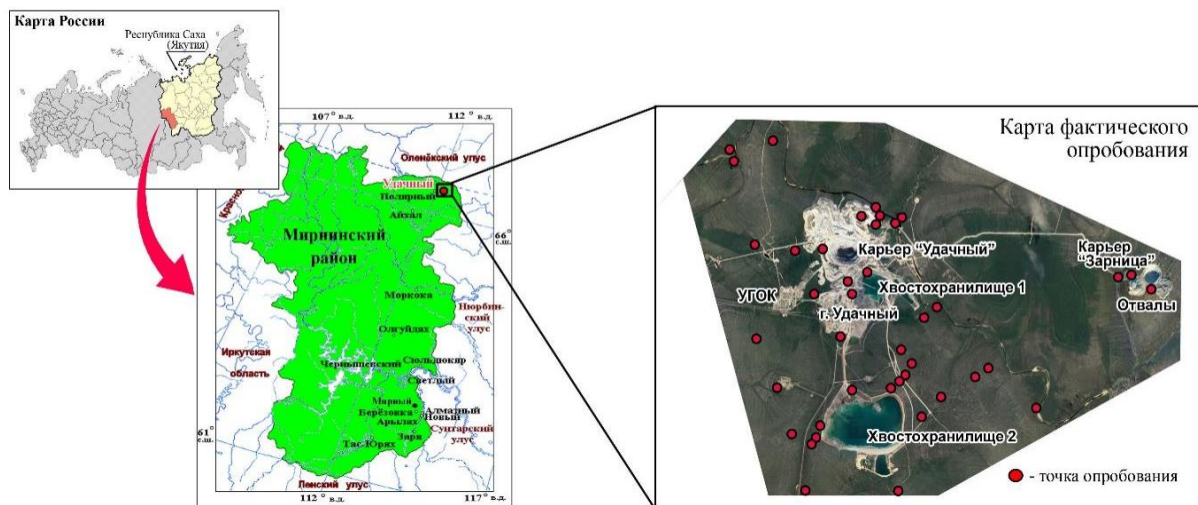
Учитывая вышеизложенное, задача данной работы состояла в том, чтобы: 1) выявить особенности пространственного распределения тяжелых металлов в поверхностном слое почв северо-таежных ландшафтов Северо-Западной Якутии, 2) определить элементы с наиболее высокой факторной нагрузкой, которые представляют «следы» вторичного загрязнения, 3) определить источники и очаги загрязнения, представляющие экологический риск.

### Объект и методы исследования

**Район исследования.** Исследования проводились в центральной части Далдыно-Алакитского горнопромышленного района Северо-Западной Якутии (Северо-Восток России) на территории Далдынского кимберлитового поля (N 66°25'47"E 112°24'07") (рис. 1). Административно-территориально входит в Мирнинский район Республики Саха (Якутия). В пределах Далдынского кимберлитового поля расположено одно из крупнейших промышленных предприятий Якутии – Удачный горно-обогатительный комбинат

(далее Удачный ГОК) АК «АЛРОСА» (ПАО), существующий с 1971 г. В настоящее время Удачный ГОК ведет разработку двух коренных месторождений алмазов: кимберлитовых трубок «Удачная» и «Зарница». Кимберлитовая трубка «Удачная» расположена в 15 км от города Удачный. Добыча ведется открытым и закрытым способом. Кимберлитовая трубка «Зарница» находится в том же кимберлитовом поле и располагается в 18 км от города. Добыча ведется открытым способом. Выбросы в атмосферу Удачным ГОКом увеличились с 1,36 тыс. т в 2005 г. до 3,85 тыс. т в 2020 г. [19].

В геологическом отношении территория исследования приурочена к области сопряжения юго-западного склона Анабаро-Оленёкской антеклизы и северо-восточного борта Тунгусской синеклизы. В строении территории участвуют кристаллические породы архея, карбонатные и терригенно-карбонатные отложения венда, кембрия, ордовика и силура, терригенные образования карбона. Глубина залегания кристаллического фундамента составляет 2,4–2,5 км. Осадочный чехол интродуцирован пластовыми телами и дайками долеритов, трубками взрыва, дайками и жилами кимберлитов. Четвертичные отложения представлены различного генезиса песками, галечниками, пылеватыми супесями, часто со значительными включениями крупнообломочного материала [20].



**Рис. 1.** Карта месторасположения района исследования с нанесением точек опробования почв на территории Удачного горно-обогатительного комбината

**Fig. 1.** Map of the location of the study area with plotting soil sampling points on the territory of the Udachny Mining and Processing Division (MPD)

Климат резко-континентальный, который проявляется в больших годовых колебаниях температуры воздуха и относительно малом количестве выпадающих осадков. Среднегодовая температура составляет 12,7 °С, амплитуда максимума и минимума средних данных по месяцам составляет от –41,6 до 14,8 °С. Перепад средних температур между холодным и теплым временами года очень велик и составляет от 34 до –64 °С [21].

Среднегодовые суммы осадков равны 200–250 мм и 75–80 % их выпадает в теплое время года (с апреля

по октябрь). Снежный покров сохраняется в течение 220–250 дней в году, высота его не велика [22].

Территория Далдыно-Алакитского района находится в зоне сплошного распространения и близкого залегания многолетнемерзлых пород, но особенности и мощность их строения различны в разных климатических зонах. Мощность мерзлотной толщи определяется в 250–400 м. Многолетняя мерзлота способствует фиксации осадков в пределах деятельного слоя почвы. В условиях низкой относительной влаж-

ности воздуха, высоких летних температур и недостаточного количества атмосферных осадков летнее оттаивание мерзлоты способствует постоянному увлажнению почвы. При увеличении мощности деятельного горизонта, если исключается дополнительное грунтовое увлажнение, происходит заметное иссушение почв с поверхности, что в свою очередь сказывается на структуре и флористическом составе напочвенного покрова и древостоя [21].

Растительный покров территории исследования находится в подзоне редкостойных северотаежных лиственничных лесов. Доминируют лиственничные леса, занимающие 80 % площади территории, представленные такими типами, как лиственничники ольховниковые (*Lárix gmelinii*, *Duschekia fruticosa* Rupr.), брусничные (*Vaccinium vitis-idaea* L.), багульниково-брусничные (*Ledum palustre* L., *Vaccinium vitis-idaea* L.), голубично-брусничные (*Vaccinium uliginosum* L., *Vaccinium vitis-idaea* L.), багульниково-зеленомошные (*Ledum palustre* L., *Aulacomnium palustre*), голубично-зеленомошные (*Vaccinium uliginosum* L., *Aulacomnium palustre*), багульниково-сфагновые (*Ledum palustre* L., *Sphagnum angustifolium*) [22].

Почвы Далдыно-Алаkitского района входят в состав Восточно-Сибирской мерзлотно-северотаежной области бореального (умеренно холодного) пояса почв России. По почвенно-географическому районированию Якутии [23] территория относится к Вилюйско-Оленекской почвенной провинции и Оленеко-Мархинскому району.

В составе общей площади почвенного покрова Далдыно-Алаkitского района криоземы (по классификации WRB Cryosols) занимают 40,7 %. Мерзлотные аллювиальные (по WRB Fluvisols) почвы являются интразональным типом и в пределах данной территории располагаются на 19,4 % площади. Подчиненными типами являются мерзлотные дерново-карбонатные неполноразвитые (по WRB Rendzic Leptosols) и мерзлотные дерново-глеевые почвы (по WRB Umbric Gleysols) [21].

**Отбор проб и химический анализ.** В ходе полевой работы в 2019 г. выбраны ключевые участки (42 точки наблюдения) в пределах промышленной площадки Удачинского ГОК (вблизи карьера кимберлитовых трубок, отвалов, хвостохранилищ, фабрики и других техногенных объектов), на которых отобраны почвенные образцы. Опробование почв на территории исследования проводилось из поверхностного слоя почв на глубину 0–20 см, где происходят основные изменения физико-химических свойств, связанные с антропогенной нагрузкой. Всего отобрано 42 пробы почвенного материала.

Все образцы почвы высушены при комнатной температуре и просеяны через сито с размером ячеек 1 мм для удаления крупных корней растений, гравийного материала и других посторонних включений. В подготовленных почвенных образцах определяли следующие параметры:

1) показатель pH в суспензии почвы 1:2,5 методом потенциометрии на pH-метре S220 Mettler Toledo Seven Compact Advanced;

2) содержание органического вещества (гумуса) по И.В. Тюрину методом колориметрии на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ;

3) подвижные формы Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn и As методом атомно-абсорбционной спектрометрии на МГА-915 ГК Люмэкс в экстрагенте 1 Н HNO<sub>3</sub>. Микроэлементы и тяжелые металлы, извлекаемые 1 Н HNO<sub>3</sub>, представляют собой максимальное содержание потенциально доступных металлов в растениях [24].

Химический анализ каждого образца проводили в двух повторях относительно контроля аналитической точности. Точность анализов проверяли по эталону почвенного стандарта СДПС-1 (*AlbicPodzols*) и ССК-1 (*HaplicCalcisols*).

**Многомерный статистический и пространственный анализ.** Перед статистическим анализом распределение набора данных оценивали с помощью методов «Box-plot», Колмогорова-Смирнова ( $p < 0,2$ ) и Шапиро-Уилка ( $p < 0,05$ ); если значение распределения не было нормальным, данные преобразовывались в соответствии с принципами анализа композиционных данных (CoDa) [25–27] с использованием центрированного логарифмического преобразования (clr) – нового подхода, который недавно доказал свою пригодность [28–30]. Для построения модели использовались только данные концентрации элементов, преобразованные в clr. Преобразование clr выполняется путем нормализации (центрирования) логарифмически преобразованных частей для каждого образца по его среднему геометрическому значению. Логарифмическая трансформация преобразует композиционные данные (относительные значения с постоянной суммой) в многомерное реальное пространство, в то время как нормализация к среднему геометрическому гарантирует, что элементы с более высокой концентрацией не будут чрезмерно подчеркиваться в дальнейшем статистическом анализе. Для преобразования необработанных данных в данные clr-преобразования использовалось программное обеспечение CoDaPack (версия 2.03.01, Университет Жироны, Испания) [31].

Для интерпретирования данных в соответствии с теорией происхождения элементов – литогенного, антропогенного или смешанного, применялся метод главных компонент, который представляет собой ортогональное линейное преобразование и отображает данные из исходного пространства признаков в новое пространство меньшей размерности [32, 33]. В данной работе применялся метод Varimax normalized для ортогонального вращения. Также применен кластерный анализ для разделения переменных на несколько взаимоисключающих кластеров, который наглядно отражает расстояние между элементами и позволяет выявить взаимосвязь между элементами. В качестве эталона измерения использовалась корреляция Пирсона [34].

Пространственный анализ позволяет выявить пространственные закономерности формирования ареалов загрязнения и их источники, представляющие угрозу экологического риска [35]. На основании опорных точек, взятых в разных местах поверхности, создается (интерполируется) непрерывная поверхность.

### Результаты и их обсуждение

Свойства почв и концентрации микроэлементов в почве. Описание исходных данных основных статистических показателей свойств почв и концентрации

микроэлементов, определенных в пробах верхнего слоя почв промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Дескриптивная статистика свойств почв и содержания подвижных форм микроэлементов на территории промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината (n=42)

**Table 1.** Descriptive statistics of soil properties and mobile forms of trace elements on the territory of the industrial site of the Udachny Mining and Processing Division (n=42)

Элементы, мг/кг Elements, mg/kg	Mean	Geom. mean	Median	Min	Max	CV	SD	SE	Skewness	Kurtosis
Pb	2,3	1,5	2,5	0,1	5,2	2,5	1,6	0,2	0,04	-1,3
Ni	13	8,5	17	0,4	27	78	8,8	1,4	-0,0004	-1,4
Mn	30	30	31	16	40	40	6,4	1,0	-0,4	-0,6
Cd	0,1	0,1	0,1	0,004	0,9	0,03	0,2	0,03	3,1	12
Co	3,9	2,3	4,8	0,03	7,5	7,3	2,7	0,4	-0,2	-1,7
Cr	4,5	2,5	4,8	0,1	8,5	11	3,3	0,5	-0,1	-1,8
Zn	21	12	16	1,3	101	499	22	3,4	2,3	6,0
As	0,2	0,1	0,2	0,02	0,7	0,02	0,2	0,03	1,3	1,7
pH	7,8	7,8	8,1	6,3	9,1	0,7	0,8	0,1	-0,3	-1,4
SOM, %	6,3	3,3	3,5	0,4	34	68	8,3	1,9	2,5	7,0

Примечание: Mean – среднее арифметическое; Geom. mean – среднее геометрическое; Median – медиана; Min – минимальное значение; Max – максимальное значение; CV (coefficient of variation) – коэффициент вариации, %; SD (standard deviation) – стандартное отклонение; SE (standard error of the mean) – стандартная ошибка среднего значения; Skewness – асимметрия; Kurtosis – эксцесс; SOM (soil organic matter) – органическое вещество почвы (гумус).

Содержание органического вещества (гумуса) в верхнем слое почв исследуемой территории достаточно высокое и характеризуется высокой пространственной изменчивостью (CV=68 %), максимальные значения превышают минимальное в 30 раз. Значения асимметрии указывают на то, что распределение гумуса ненормальное. Также высокое расхождение содержания гумуса подтверждается тем фактом, что медианное значение этого показателя намного ниже его среднего значения. Связано это скорее с условиями промышленного освоения территории, когда почвы утрачивают естественные черты из-за техногенного подавления процессов почвообразования. Поэтому существующие методы определения гумуса отражают не столько гумусированность почв, сколько общее содержание углерода в них, в составе которого существенна техногенная составляющая (углеводороды топлива, смазочные масла и др.) [36].

pH почвы колеблется от 6,3 до 7,4. По показателю pH видно, что пространственная вариабельность совсем мала (CV=0,7 %) и не соответствует нормальному распределению, имеет отрицательную асимметрию. Большинство почвенных образцов были нейтральными, их доля составляла 40 %, 35 % образцов почв имели слабощелочную реакцию и только 25 % слабокислую. Кислый pH частично обусловлен исходным материалом, топографией, текстурой почвы и растительностью [37, 38] и отчасти низким содержанием органического вещества. А щелочная среда способствует формированию в почвах геохимических барьеров, на которых могут осажаться и накапливаться многие тяжелые металлы [39]. Исходя из этого высока вероятность аккумуляции потенциально токсичных элементов, которые могут представлять высокую угрозу загрязнения почв.

Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почвы Удачинского горно-обогатительного комби-

ната уменьшается в порядке Zn>Ni>Mn>Cr>Co>Pb>Cd>As. Данные результаты показывают, что распределение As, Cd, Pb, Co, Cr и Mn на территории исследования является более гомогенным, чем распределение Ni и Zn. Принято, что элементы, имеющие природное происхождение, обычно обладают низкими CV, а элементы, связанные с антропогенными источниками, характеризуются высокими CV и отражают неоднородное распределение концентраций [33, 40]. Исходя из этого можно сказать, что на концентрации Ni и Zn могут влиять как эндогенные, так и экзогенные факторы.

В природе содержание элементов подчиняется нормальному распределению при отсутствии других источников поступления поллютантов (например, антропогенных поступлений) [41]. Анализ коробчатых диаграмм «Box-plot» показал (рис. 2), что у Cr, Zn и As медиана находится примерно в середине шкалы процентилей; в диаграммах Mn, Cd, Co и Pb срединная линия проходит почти посередине прямоугольника, кроме Ni. В случае Cd, Zn и As есть несколько экстремальных выбросов, которые указывают на присутствие точек с высокими концентрациями, возможно, связанными также с внешними факторами.

Анализ данных по Колмогорову-Смирнову и Шапиро-Уилка показал, что концентрации элементов Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Zn и As в поверхностном слое почв исследуемой территории отличаются от нормального распределения и указывают на то, что на них могут сильно влиять внешние факторы. Приблизительно нормальное распределение Mn указывает на связь с почвообразующим материалом.

После проверки данных на соответствие закону нормального распределения выполнено преобразование данных с помощью центрированного логарифмического преобразования (clr) (табл. 2). После применения данных, преобразованных с помощью clr, соответствующее стандартное отклонение явно уменьши-

лось, а медиана и среднее значение имели тенденцию к сходимости. Действительно, данные *clr* показали нор-

мальное распределение в результате уменьшения веса выбросов.

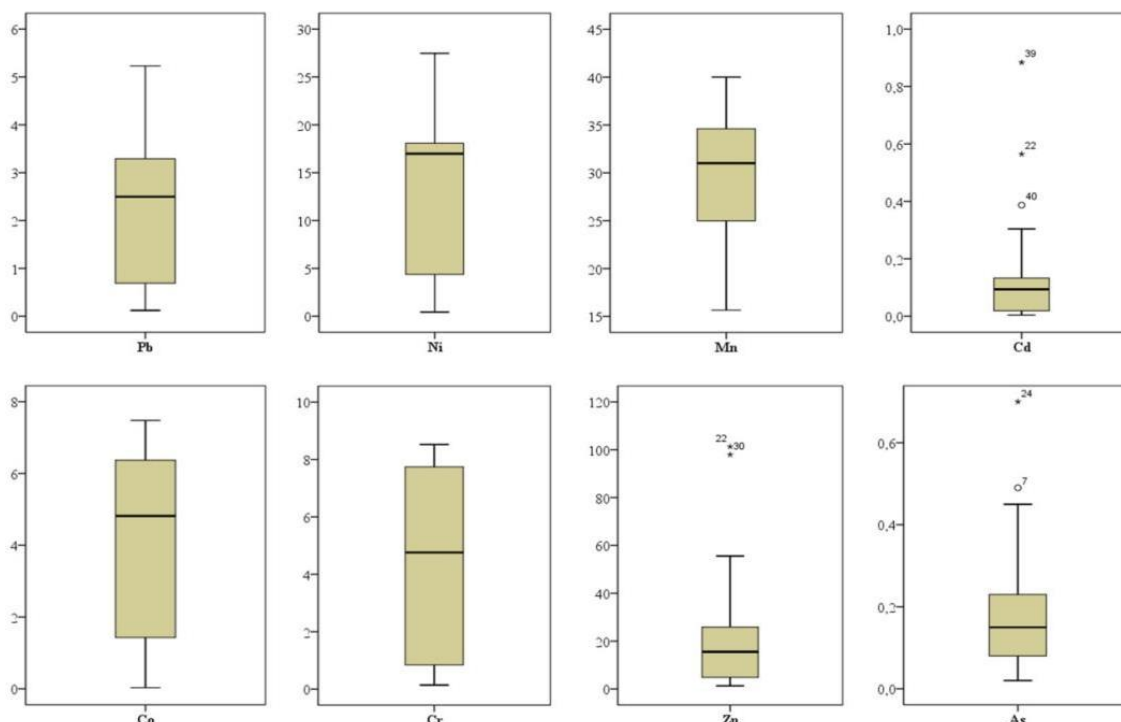


Рис. 2. Коробчатая диаграмма «Box-plot» распределения микроэлементов

Fig. 2. Box-plot distribution of trace elements

Таблица 2. Дескриптивная статистика микроэлементов, преобразованных в *clr*, на территории промышленной площадки Удачнинского горно-обогатительного комбината ( $n=42$ )

Table 2. Descriptive statistics of *clr*-transformed trace elements on the territory of the industrial site of the Udachny Mining and Processing Division ( $n=42$ )

Элементы, мг/кг Elements, mg/kg	Mean	Geometri с mean	Median	CV	SD	SE
Pb	0,03	0,02	0,03	0,5	0,7	0,1
Ni	0,16	0,13	0,16	0,4	0,6	0,1
Mn	0,48	0,44	0,43	0,7	0,8	0,1
Cd	0,002	0,001	0,001	0,9	1,0	0,1
Co	0,05	0,03	0,05	0,5	0,7	0,1
Cr	0,05	0,04	0,06	0,5	0,7	0,1
Zn	0,23	0,18	0,22	0,4	0,6	0,1
As	0,003	0,002	0,002	0,8	0,9	0,1

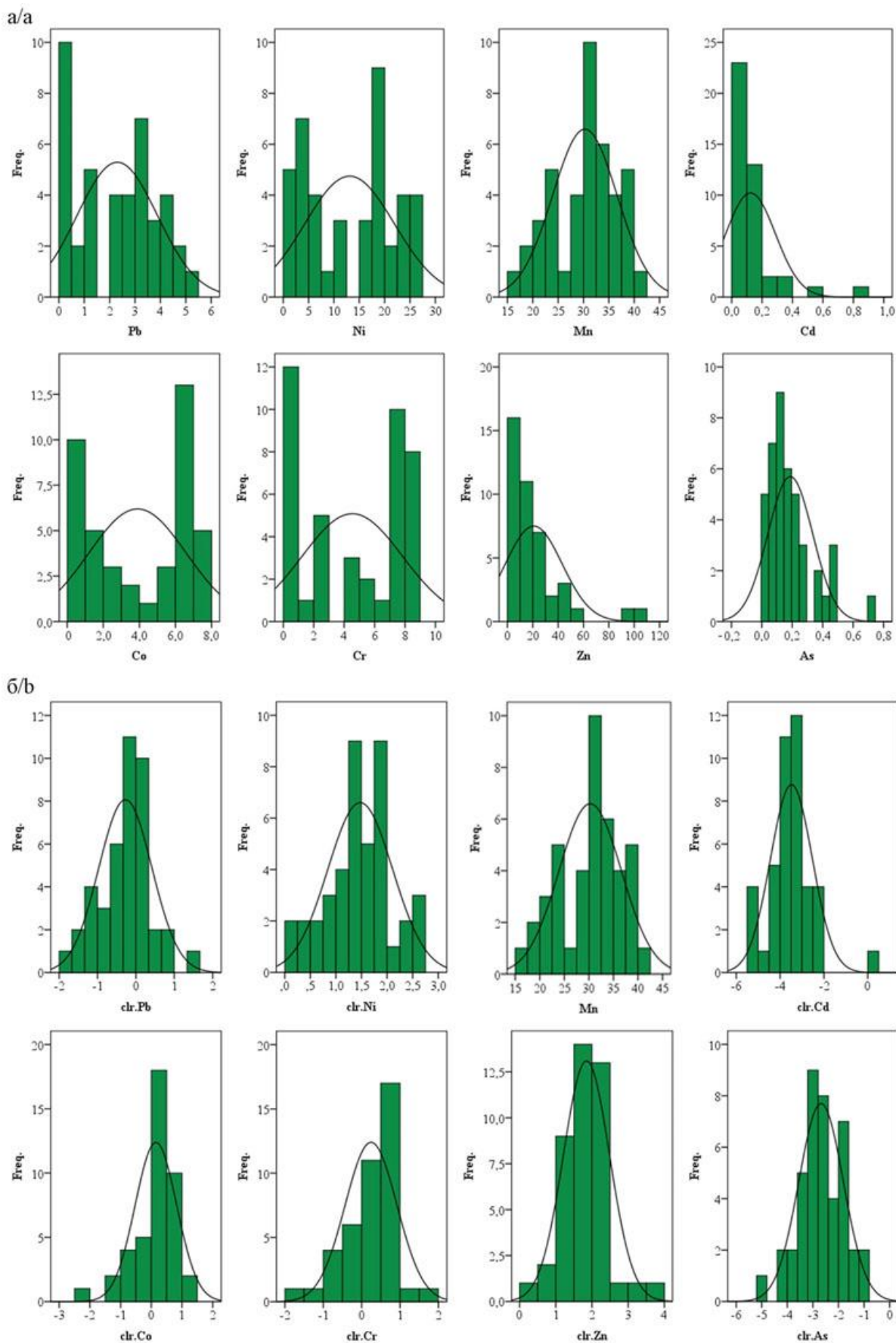
Примечание: Mean – среднее арифметическое; Geom. mean – среднее геометрическое; Median – медиана; CV (coefficient of variation) – коэффициент вариации, %; SD (standard deviation) – стандартное отклонение; SE (standard error of the mean) – стандартная ошибка среднего значения.

На основании сравнения гистограмм (рис. 3) исходного и композиционного массивов данных можно сделать вывод, что: а) при рассмотрении исходного массива практически для всех элементов обнаруживаются асимметричные распределения, причем эти распределения смещены в основном за счет наличия выбросов; б) набор данных, преобразованных с по-

мощью *clr*, показывает важную особенность, поскольку предполагает нормальность. Таким образом, делается вывод, что набор данных, преобразованных с помощью *clr*, и набор композиционных данных имеют два основных преимущества, а именно, они позволяют нам работать с пропорциями и улучшать нормализацию данных. Аномальные концентрации исследуемых элементов, значительно превышающие фоновые значения, являются классическими признаками тяжелой производственной деятельности.

Для выявления возможного парагенетического накопления элементов в верхних горизонтах почв использовался факторный анализ – метод главных компонент [42], минимизация количества переменных с высокой факторной нагрузкой проводилась вращением матрицы факторных нагрузок по методу Varimax normalized. Путем варимаксного вращения были получены окончательные значения собственных векторов, которые рассматриваются как «следы» источников выбросов [43] (табл. 3).

Согласно критерию Кайзера, первые три компонента с собственными значениями выше 1 имеют доминирующее влияние. Эти три фактора составляют 71,8 % от общей дисперсии выборок. Процент объясненной дисперсии для первого компонента (F1) наибольший и составляет 41,7 %, что свидетельствует о существовании одного доминирующего источника выброса или группы источников эмиссии некоторых элементов. Для остальных компонентов процент дисперсии составляет: F2 – 15,9 %, F3 – 14,2 %.



**Рис. 3.** Гистограммы элементов: исходные данные (а) и clr-преобразованные данные (б)  
**Fig. 3.** Trace elements histograms: original data (a) and clr-transformed data (б)

**Таблица 3.** Факторная нагрузка варимаксного вращения  
**Table 3.** Factor loading of varimax rotation

Показатели/Index	F1	F2	F3
Pb	0,44	0,33	0,45
Ni	<b>0,94</b>	-0,06	-0,01
Mn	0,13	-0,21	<b>0,68</b>
Cd	0,10	<b>0,90</b>	-0,01
Co	<b>0,98</b>	-0,12	-0,07
Cr	<b>0,96</b>	-0,03	0,11
Zn	<b>0,82</b>	0,27	0,10
As	-0,09	0,06	<b>0,86</b>
pH	0,18	-0,09	0,09
SOM	-0,59	<b>0,66</b>	-0,25
Собственные значения/Eigen value	4,17	1,59	1,42
% общей дисперсии/% of total variance	41,7	15,9	14,2

Первый компонент (F1) в основном характеризуется элементами Co, Cr, Ni и Zn (диапазон нагрузки составляет 0,82–0,98), что подтверждает сильные положительные связи между ними. Его воздействие проявляется в увеличении концентраций данных микроэлементов в поверхностном слое почвы исследуемого участка. Co, Cr и Ni являются типоморфными кимберлитам элементами, которые отражают геохимическую специфику территории Далдынского кимберлитового поля. Поэтому высокие концентрации этих элементов объясняются вторичным поступлением на поверхностный слой почвы в виде повторно взвешенной пыли почвенного материала в результате аэрогенного распространения от буровзрывных работ, ветровой эрозии отвалов и т. д., а также при воздействии антропогенной и производственной деятельности на территории промышленной площадки УГОК. R. Sain и J. Rodriguez в работах [44] и [45], соответственно, получили результаты, где Co, Cr и Ni также были сгруппированы в одном факторе в поверхностном слое почвы вокруг сталеплавильного завода в Китае и свинцово-цинкового завода в косовском Митровице и при этом имели естественные/педогенные источники поступления. Получается, что элементы Co, Cr и Ni представляют собой совокупность естественных и техногенных источников поступления элементов в почвенную среду.

Цинк, в силу своей подвижности, является одним из наиболее распространенных загрязнителей окружающей среды. У цинка высокая технофильность [46], которая с годами только возрастает [47]. Поступление Zn от техногенных источников в семь–восемь раз больше, чем от природных. Почти половина цинка поступает от различных деятельности добывающей промышленности и аккумулируется в основном в верхнем слое почв [48]. По данным ряда исследований, в зоне деятельности различных промышленных предприятий отмечается высокая концентрация Zn, которая также подтверждается факторным анализом и имеет высокую нагрузку F1 [17, 33, 49]. Часто высокие концентрации Zn связывают с воздействием транспортных средств, которые поступают от сжигания топлива, тормозных накладок, маслосборников, прокладок головок цилиндров и др. [5, 50, 51]. Помимо вышеупомянутого влияния транспортного воздействия, не исключается, что Zn может иметь и геогенное происхождение [33, 52].

Второй компонент (F2) характеризуется высокой нагрузкой Cd (0,90). Исследования показывают, что практически все предприятия выбрасывают в окружающую среду пыль, отличающуюся содержанием кадмия, которое существенно превышает его уровни в верхнем горизонте почв [33, 53]. Поэтому часто наблюдаемое обогащение кадмием поверхностных слоев связано с загрязнением [48]. В данном случае наибольшее влияние может оказывать высокое содержание органического вещества слабой степени разложения, которое выступает в роли биогенного барьера и аккумулирует высокие концентрации Cd. О чем свидетельствует положительная корреляция содержания гумуса с концентрациями кадмия.

Третий компонент (F3) имеет наименьший суммарный вклад и характеризуется высокой нагрузкой As (0,86). В поверхностном слое почв исследуемой территории содержание As в целом достаточно низкое, но имеются некоторые локальные точки с относительно высокими значениями, которые, возможно, связаны с воздействием антропогенной деятельности на промышленной площадке УГОК. Возможно, как раз эти точки и были зафиксированы как выбросы при анализе коробчатой диаграммы и показали ненормальное распределение. Невысокие концентрации As в большей степени связаны с содержанием его в горной породе [48], а значит, имеют геогенное происхождение. В F3 также можно отметить невысокую нагрузку Mn (0,68), на содержание которого влияет как исходный материал почвы, так и экзогенные воздействия.

Помимо выделенных элементов с высокими значениями факторной нагрузки, во всех компонентах прослеживается слабая нагрузка у Pb (0,33–0,45). Естественные содержания Pb в почвах наследуются от материнских пород. Однако из-за широкомасштабного загрязнения среды свинцом большинство почв обогащается этим элементом, особенно на поверхности. В литературе имеется большое число данных о содержании Pb в почве, однако иногда трудно отделить данные, характеризующие фоновые уровни Pb в почвах, от данных, связанных с загрязнением поверхностного слоя почв [48, 54, 55].

В ходе кластерного анализа построена дендрограмма с использованием корреляции Пирсона в качестве эталона измерения (рис. 4). На дендрограмме отчетливо выделяются три кластера: Ni-Cr-Co-Pb, Cd-Zn, Mn-As. Тесная ассоциация элементов предполагает, что они имеют общий источник [56]. Элементы Ni, Cr, Co, Mn и Zn входят в состав оливина, который является доминантной фазой кимберлита [57]. Co, Cr, Ni, Mn – показатели ультраосновного магматизма, элементы типоморфные кимберлитам, которые отражают геохимическую специфику Далдынского кимберлитового поля. Эти элементы хорошо распознаются по потокам вторичного рассеяния и характеризуются как природные, так и техногенные геохимические аномалии. А Zn и Pb являются индикаторами контактов кимберлитов и вмещающих пород [58]. Но в настоящей работе Zn и Cd образуют отдельный кластер, что, скорее, обусловлено тесной связью с орга-

ническим веществом [48], из-за чего происходит их сорбция в поверхностном слое почвы. Аналогичные результаты были получены и в предыдущих исследованиях [59–61].

Таким образом, прослеживается связь между группой сидерофильных (Co, Cr, Ni и Mn) и халькофильных (Zn, Cd и As) элементов, которые находят свое отражение в формировании как природных, так и техногенных геохимических аномалий в почвенном покрове.

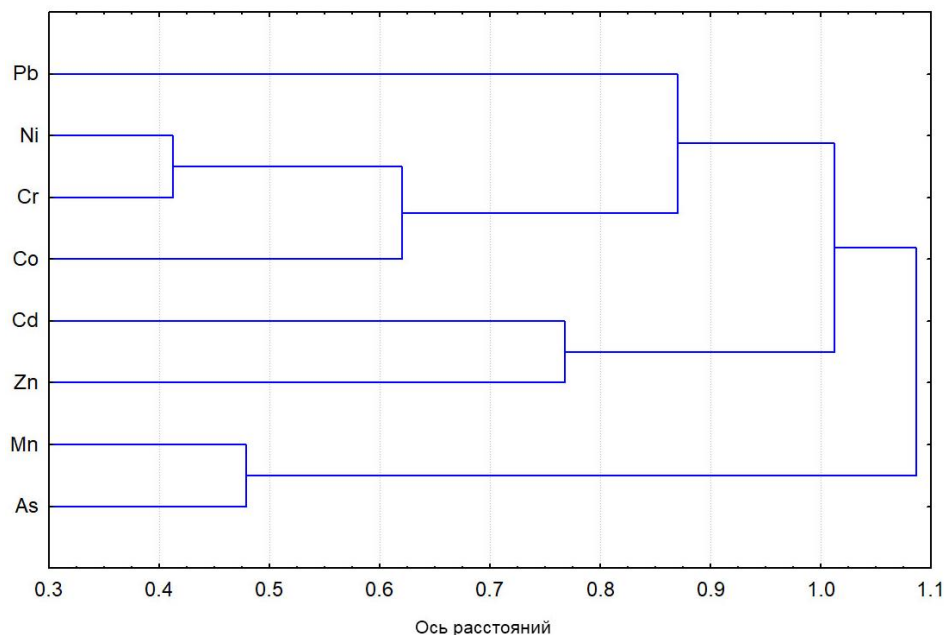


Рис. 4. Дендрограмма результатов кластерного анализа микроэлементов на территории исследования.

Fig. 4. Dendrogram results of cluster analysis for microelements on the study area

Пространственное распределение микроэлементов в поверхностном слое почвы. Карты распространения исследуемых микроэлементов в поверхностном слое почв промышленной площадки Удачинского ГОК представлены на рис. 5.

Тенденции распределения Co, Cr и Ni в верхних горизонтах почв являются схожими, что свидетельствует о их когерентности и едином источнике поступления. Наиболее высокие концентрации отмечены непосредственно в зоне влияния карьера кимберлитовой трубки «Удачный» и хвостохранилища № 1. В эту же факторную группу элементов F1 входил и Zn, но с меньшей долей. По сравнению с Co, Cr и Ni, распределение Zn в поверхностном слое почв отличается. Очаг загрязнения Zn находится непосредственно на территории города Удачный, а также хвостохранилища № 1. Исходя из этого можно сказать, что почвенная нагрузка этих металлов на поверхностный слой почвы происходит за счет воздействия антропогенных факторов.

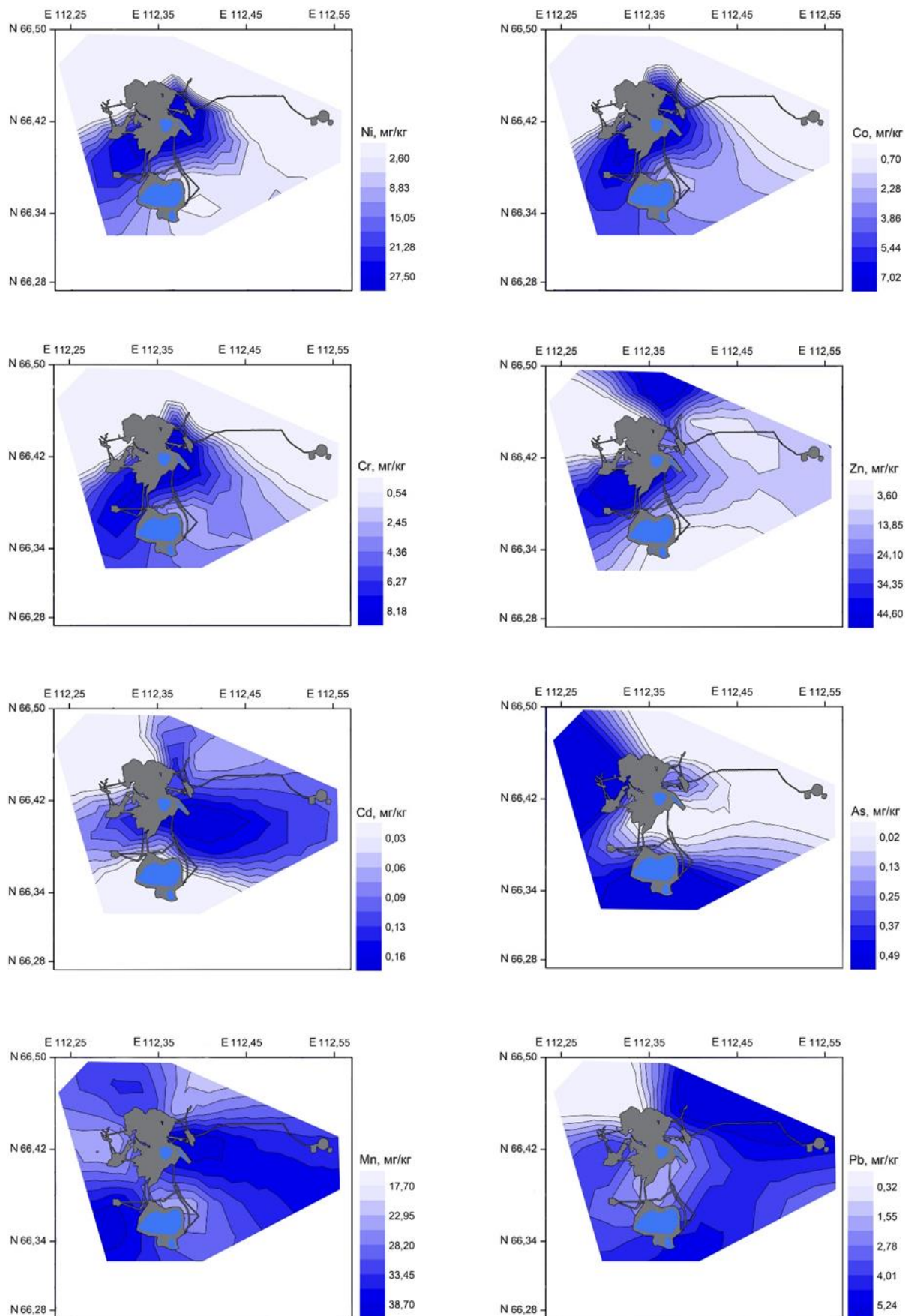
Пространственное распределение Cd, Mn и Pb не имеет привязки к объектам территории промышленной площадки УГОК и города Удачный. Можно сделать вывод, что исходные материалы и естественные процессы повлияли на аккумуляцию Cd, Mn и Pb в поверхностных горизонтах почв, что согласуется и с их различными моделями пространственного распределения.

As имеет схожий характер распределения с элементами Cd, Mn и Pb, но в отличие от них у As наблюдается один очаг высокой концентрации в районе полигона дренажных рассолов и высокоминерализованных вод «Октябрьский».

Исходя из этого можно предположить, что источниками поступления As на поверхностный слой почвы являются как природные, так и антропогенные факторы, например в результате аварийных разгрузок нагнетательных скважин на полигоне «Октябрьский».

При сравнении содержания подвижных форм микроэлементов в промышленной площадке Удачинского ГОК с ПДК фиксируется превышение норм для Zn до 4 раз и Ni до 6 раз, а именно, в образцах грунтов из хвостохранилища № 1 и почвгрунтов, отобранных в подошве отвалов пустых пород (рис. 6). Высокие концентрации никеля и цинка могут быть связаны с геохимическими особенностями гипергенно изменённых кимберлитов. Никель может концентрироваться и в корках выветривания ультраосновных пород в зоне нонтронитообразования. Нонтронит является главным никельсодержащим минералом, создающим промышленные концентрации силикатных никелевых руд. В отличие от таковых гипергенно изменённые высоконикелевые окварцованные кимберлиты характеризуются также высокими содержаниями Zn, отличающимися изменёнными кимберлитами от кор выветривания основных пород [62]. Таким образом, наблюдается накопление Ni и Zn, которые при длительной разработке месторождения и функционировании обоганительных производств будут представлять токсикологическую опасность и могут являться источником вторичного загрязнения для всей экосистемы и населенного пункта – г. Удачный, что неблагоприятно скажется на здоровье местного населения.





**Рис. 5.** Пространственное распределение микроэлементов в поверхностном слое почв территории промышленной площадки Удачинского ГОК

**Fig. 5.** Spatial distribution of trace elements on the surface soil layer of the territory of the industrial site of the Udachny MPD

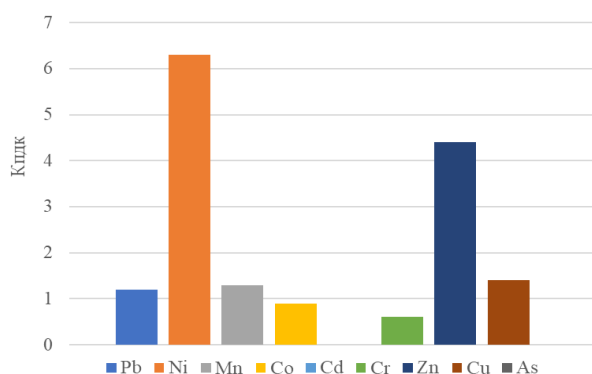


Рис. 6. График превышения значений ПДК подвижных форм микроэлементов в почвах промышленной площадки Удачинского ГОК

Fig. 6. Graph of excess of MPC values of mobile forms of trace microelements in soils of the industrial site of the Udachny MPD

### Заключение

На основании проведенных исследований с помощью инструментов статистического анализа определено, что в поверхностном слое почв промышленной площадки Удачинского ГОК на территории Далдынского кимберлитового поля распространение микроэлементов не соответствует нормальному распределению из-за большого разброса значений. Это связано с комплексностью естественных и техногенных воздействий. Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почв исследуемой территории распределяются в порядке убывания:  $Zn > Ni > Mn > Cr > Co > Pb > Cd > As$ .

По результатам анализа данных методом главных компонент выявлены три ассоциации элементов с наибольшей степенью нагрузки на поверхностный

слой почвы: F1 – Co, Cr, Ni и Zn; F2 – Cd; F3 – As и Mn. Первый компонент представляет собой совокупность естественных и техногенных источников поступления элементов в почвенную среду. Второго в большей степени связан с почвенными параметрами природного происхождения. Третий имеет как природное, так и техногенное происхождение.

Установлена связь между группой сидерофильных (Co, Cr, Ni и Mn) и халькофильных (Zn, Cd и As) элементов, которые находят свое отражение в формировании как природных, так и техногенных геохимических аномалий в почвенном покрове.

Геостатистический анализ пространственного распределения микроэлементов в верхнем слое почв территории промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината позволил определить основные источники и очаги загрязнения. Источником поступления Co, Cr и Ni является участок карьера кимберлитовой трубки «Удачная» и хвостохранилище № 1 обогатительной фабрики, Zn – хвостохранилище № 1, селитебный район г. Удачный, As – полигон высокоминерализованных рассолов «Октябрьский».

Таким образом, многомерный статистический анализ данных позволяет выявить скрытые и неочевидные закономерности содержания и распределения элементов в почве, а также источники и очаги загрязнения, представляющие экологические риски для исследуемой территории.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта Государственного задания Минобрнауки РФ FUEM-2019-0003 «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазодобывающей провинции».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородин Н.А., Голов В.И. Содержание различных форм Cu, Zn и Mn в почвах города Благовещенск (Амурская область) // Вестник ДВО РАН. – 2013. – № 5. – С. 69–76.
2. Гусева Н.В., Воробьева Д.А., Евтюгина З.А. Особенности взаимодействия в системе вода–порода на территории водосбора озера Имандра (Кольский полуостров) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 177–188.
3. Воробьева Д.А., Гусева Н.В. Геохимическая характеристика почв территории с высокой аэротехногенной нагрузкой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 149–159.
4. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe / E.G. Pacyna, J.M. Pacyna, J. Fudala et al. // Atmospheric Environment. – 2007. – V. 41. – № 38. – P. 8557–8566.
5. Nezhada M.T.K., Tabatabaai S.M., Gholami A. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran // Journal of Geochemical Exploration. – 2015. – V. 152. – P. 91–109.
6. Елсукова Е.Ю., Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю. Техногенная трансформация потоков тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия медно-никелевого производства // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 12-1 (90). – С. 118–124.
7. Evaluation of the potential risks of heavy metal contamination in rice paddy soils around an abandoned Hg mine area in Southwest China / B. Adlane, Z. Xu, X. Xu, L. Liang, J. Han, G. Qiu // Acta Geochimica. – 2020. – V. 39. – P. 85–95.

8. Зволинский В.П., Капралова Д.О., Левашова Е.А. Геостатистический анализ пространственного распределения стойких органических загрязнителей в почвах г. Москвы в пределах Московской кольцевой автодороги // Мониторинг. Наука и Техника. – 2019. – № 4. – С. 36–49.
9. Харина Г.В., Алешина Л.В. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах Свердловской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 173–183.
10. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2021 году. – Якутск, 2022. – 776 с.
11. Legostaeva Ya., Gololobova A. Long-term geochemical monitoring of the soil cover in the impact zone of diamond mining enterprises: a case study in the Nakyn kimberlite field, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – Iss. 193. – V. 6. – 337.
12. Гололобова А.Г. Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 146–157.
13. Экологические проблемы Верхоянского района / Г.Н. Саввинов, П.П. Данилов, А.А. Петров, В.С. Макаров, В.С. Боесков, С.Е. Григорьев // Вестник СВФУ. – 2018. – № 6 (68). – С. 18–33.
14. Данилов П.П., Легостаева Я.Б., Саввинов Г.Н. Техногенные ландшафты и их влияние на естественный почвенный покров Западной Якутии // Вестник Якутского государственного университета. – 2005. – Т. 2. – № 3. – С. 70–75.
15. Хованская М.А., Косинова И.И. Влияние горнодобывающей и перерабатывающей деятельности на почвы Айхальского рай-

- она (Саха-Якутия) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2010. – № 1. – С. 282–285.
16. Шадринова О.В. К вопросу засоления почв на территории алмазодобычи (западная Якутия) // Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2021. – С. 564–567.
17. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation / J.A. Acosta, A. Faz, S. Martínez-Martínez, R. Zornoza, D.M. Carmona, S. Kabas // Journal of Geochemical Exploration. – 2011. – V. 109. – Iss. 1-3. – P. 8–17.
18. Markus J., McBratney A.B. A review of the contamination of soil with lead: II. Spatial distribution and risk assessment of soil lead // Environmental International. – 2001. – V. 27 – P. 399–411.
19. СП Удачинский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО) // Мониторинг устойчивого развития. URL: <https://monitoring-esg.ru/esg-analitika/analitika-po-kompaniyam/sp-ak-alrosa-pao-udachninskij-gorno-obogatitelnyj-kombinat> (дата обращения 01.10.2022).
20. Легостаева Я.Б., Попов В.Ф., Ксенофонтова М.И. Гидрогеологические условия и геоэкологическая ситуация на территории подземных техногенных хранилищ при утилизации дренажных рассолов Удачинского горно-обогатительного комбината // Отечественная геология. – 2018. – № 3. – С. 93–102.
21. Легостаева Я.Б. Пространственная и внутрипрофильная дифференциация мерзлотных почв северо-западной Якутии: дис. ... канд. биол. наук. – Улан-Удэ, 2005. – 143 с.
22. Миронова С.И. Растительные сукцессии на природно-техногенных ландшафтах Западной Якутии и их оптимизация. – М.: ИД «Академия Естественная», 2016. – 140 с.
23. Атлас Якутской АССР / ред. кол.: Т.Д. Сивцев, И.А. Некрасов, Н.И. Шраин и др. – М.: Гл. упр. геодезии и картографии при Совете министров СССР, 1981. – 40 с.
24. Šmejkalová M., Mikanová O., Borůvka L. Effects of heavy metal concentrations on biological activity of soil micro-organisms // Plant, Soil and Environment. – 2003. – V. 49. – P. 321–326.
25. Aitchison J. The statistical analysis of compositional data. – London, U.K.: Chapman and Hall, 1986. – 416 p.
26. Aitchison J. The statistical analysis of compositional data. – Caldwell, NJ, USA: Blackburn Press, 2003. – 460 p.
27. Pawlowsky-Glahn V., Buccianti, A. Compositional data analysis: theory and applications. – Chichester, UK; West Sussex, UK: Wiley, 2011. – 819 p.
28. Moss biomonitoring and air pollution modelling on a regional scale: delayed reflection of industrial pollution in moss in a heavily polluted region / O. Motyka, I. Pavlíková, J. Bitta, M. Frontasyeva, P. Jančík // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – V. 27. – P. 32569–32578.
29. Heavy metal (PTE) ecotoxicology, data review: traditional vs. a compositional approach / S.T. Mullineaux, J.M. McKinley, N.J. Marks, D.M. Scantlebury, R. Doherty // Science of The Total Environment. – 2021. – V. 769. – P. 145246.
30. The concept of compositional data analysis in practice – Total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe / C. Reimann, P. Filzmoser, K. Fabian, K. Hron, M. Birke, A. Demetriades, E. Dinelli, A. Ladenberger // Science of The Total Environment. – 2012. – V. 426. – P. 196–210.
31. Lawley C. Compositional symmetry between Earth's crustal building blocks // Geochemical Perspectives Letters. – 2016. – V. 2 (2). – P. 117–126.
32. Loska K., Wiechula D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry // Environment international. – 2004. – V. 30. – P. 159–165.
33. Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China / S. Huang, J. Tu, H. Liu, M. Hua, Q. Liao, J. Feng, Z. Weng, G. Huang // Atmospheric Environment. – 2009. – V. 43. – P. 5781–5790.
34. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China / G. Yuan, T. Sun, P. Han, J. Li, X. Lang // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – V. 136. – P. 40–47.
35. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics / S.L. Celine, L. Xiangdong, S. Wenzhong, C. Sharon, T. Iain // The Science of the Total Environment. – 2006. – V. 356. – P. 45–61.
36. Прохорова Н.В. Эколого-геохимическая роль автотранспорта в условиях городской среды // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2005. – № 5 (39). – С. 188–199.
37. Alvarez E., Monterroso C., Fernández M.M.L. Aluminium fractionation in Galician (NW Spain) forest soils as related to vegetation and parent material // Forest Ecology and Management. – 2002. – V. 166. – P. 193–206.
38. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China / C. Sun, J. Liu, Y. Wang, L. Sun, H. Yu // Chemosphere. – 2013. – V. 92. – P. 517–523.
39. Воробьева К.Ю., Прохорова Н.В. Особенности загрязнения медью почв объектов гражданского строительства в Самарской области // Экологический сборник 7: Труды молодых ученых. – Тольятти: ИЭВБ РАН, «Анна», 2019. – С. 115–116.
40. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China / X. Li, L. Liu, Y. Wang, G. Luo, X. Chen, X. Yang, M.H.P. Hall, R. Guo, H. Wang, J. Cui, X. He // Geoderma. – 2013. – V. 192. – P. 50–58.
41. Spatial interrelations and multiscale sources of soil heavy metal variability in a typical urban–rural transition area in Yangtze River Delta region of China / Y. Zhao, Z. Wang, W. Sun, B. Huang, X. Shi, J. Ji // Geoderma. – 2010. – V. 156. – P. 216–227.
42. Карпиченко А.А. Использование статистических методов для выявления особенностей накопления тяжелых металлов в поверхностных горизонтах почв // Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития. – Минск: Белорусский государственный университет, 2019. – С. 127–130.
43. Dordevic D., Mihajlidi-Zelic A., Relic D. Differentiation of the contribution of local resuspension from that of regional and remote sources on trace elements content in the atmospheric aerosol in the Mediterranean area // Atmospheric Environment. – 2005. – V. 39. – P. 6271–6281.
44. Heavy metal contamination of topsoil around a lead and zinc smelter in Kosovska Mitrovica/Mitrovicë, Kosovo/Kosovë / R. Šajn, M. Aliu, T. Stafilov, J. Alijagić // Journal Geochemical Exploration. – 2013. – V. 134. – P. 1–16.
45. Multiscale analysis of heavy metal contents in Spanish agricultural topsoils / J.A. Rodríguez, N. Nanos, J.M. Grau, L. Gil, M. Lopez-Arias // Chemosphere. – 2008. – V. 70. – P. 1085–1096.
46. Водяницкий Ю.Н. Формы цинка в загрязненных почвах (обзор литературы) // Химия почв. – 2010. – № 3. – С. 293–302.
47. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов. – М.: Бинном, 2008. – 670 с.
48. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4<sup>th</sup> ed. – Roca Raton: CRS Press, 2011. – 548 p.
49. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China / G-L. Yuan, T-H. Sun, P. Han, J. Li, X-X Lang // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – V. 136. – P. 40–47.
50. Jiries A.G., Hussein H.H., Halash Z. The quality of water and sediments of street runoff in Amman, Jordan // Hydrological Processes. – 2001. – V. 15. – P. 815–824.
51. Comparative studies on the concentrations of some elements in the urban air particulate matter in Lodz City of Poland and in Milan, Italy / H. Bem, M. Gallorini, E. Rizzio, M. Krzeminska // Environment International. – 2003. – V. 29. – P. 423–428.
52. Spatial distribution of heavy metal concentrations in peri-urban soils in eastern China / S. Li, L. Yang, L. Chen, F. Zhao, L. Sun // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – V. 26. – P. 1615–1627.
53. Янин Е.П. Пылевые выбросы предприятий как источник загрязнения городской среды кадмием // Экология урбанизированных территорий. – 2009. – № 1. – С. 30–35.
54. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment / G. Tóth, T. Hermann, G. Szatmári, L. Pásztor // Science of The Total Environment. – 2016. – V. 565. – P. 1054–1062.
55. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China / G. Liu, L. Tao, X. Liu, J. Hou, A. Wang, R. Li // Journal of Geochemical Exploration. – 2013. – V. 132. – P. 156–163.

56. Pan H., Lu X., Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: Contamination, source apportionment and spatial distribution // *Science of The Total Environment*. – 2017. – V. 609. – P. 1361–1369.
57. Костровицкий С.И. Минералогия и геохимия кимберлитов Западной Якутии: дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2009. – 412 с.
58. Харитонов Т.В. Алмазность Урала. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. – 1280 с.
59. Zamani A., Yaftian M.R., Parizanganeh A. Statistical evaluation of topsoil heavy metal pollution around a lead and zinc production plant in Zanjan province, Iran // *Caspian Journal of Environmental Sciences*. – 2015. – V. 13 (4). – P. 349–361.
60. A statistical approach to study the spatial heavy metal distribution in soils in the Kushk Mine, Iran / Z. Sohrabizadeh, H. Sodaieizadeh, M. Hakimzadeh, R. Taghizadeh-Mehrjardi, M.J. Ghanei Bafghi // *Geoscience Data Journal*. – 2022. – V. 00. – P. 1–13. Available from: <https://doi.org/10.1002/gdj3.175>
61. Assessment of soil and maize contamination by TE near a coal gangue-fired thermal power plant / D. Li, D. Wu, F. Xu, J. Lai, S. Li // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2020. – V. 192. – 541.
62. Зинчук Н.Н. Особенности минералов слюд в кимберлитах // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. – 2018. – № 2. – С. 29–39.

*Поступила: 07.10.2022 г.*

*Прошла рецензирование: 20.11.2022 г.*

#### **Информация об авторах**

**Гололобова А.Г.**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории металлогении Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

UDC 631.4:504.5

## INVESTIGATION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF MICROELEMENTS IN SOILS BY THE METHOD OF MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS (ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORY OF THE DALDYN KIBERLITE FIELD, NORTHWESTERN YAKUTIA)

Anna G. Gololobova<sup>1</sup>,  
nuta0687@mail.ru

<sup>1</sup> Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
39, Lenin avenue, Yakutsk, 677980, Russia.

**The relevance.** Currently, industrial activity, which processes lead to the deterioration of environmental conditions, is becoming increasingly large. Therefore, projects and measures are needed to reduce environmental damage and restore disturbed lands, which are based on preliminary studies of soil properties, the content and distribution of trace elements and heavy metals in the conditions of technogenesis.

**The main aim:** to determine the regularities of the spatial distribution of microelements and the sources of their entry into the surface layer of soils on the territory of the industrial site of the Udachny Mining and Processing Division using the tools of multivariate statistical analysis.

**Objects:** dominant soil types of the north-taiga landscapes of northwestern Yakutia.

**Methods:** potentiometric, colorimetric, atomic absorption, statistical methods (descriptive, normal distribution analysis, principal component method, spatial analysis).

**Results.** The coefficients of variation of trace elements in the upper soil layer of the study area are distributed in the following descending order: Zn>Ni>Mn>Cr>Co>Pb>Cd>As. The concentrations of the elements Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Zn, and As in the surface soil layer of the study area do not have a normal distribution, with the exception of Mn. Three factors have been identified that explain the dispersion of the content of trace elements and heavy metals in the soils of the territory of the north-taiga landscapes of North-Western Yakutia. The first factor noticeably affects the distribution of Co, Cr, Ni, and Zn; the second – Cd; and the third – As and Mn. The main sources of pollution were identified. The content of Co, Cr and Ni in the surface layer of the soil is affected by the Udachny kimberlite pipe quarry and tailing dump no. 1, Zn – by the residential area of Udachny, As – by the polygon of highly mineralized brines.

### Key words:

trace elements, heavy metals, mobile forms, soil pollution, kimberlite field, multivariate statistical analysis, spatial distribution, Yakutia.

The paper was prepared within the project of the State Task of the Ministry of Education of the RF FUEM-2019-0003 «Ecological and geochemical study of man-made arrays in the territory of Yakutia diamond-bearing province».

### REFERENCES

- Borodina N.A., Golov V.I. Soderzhanie razlichnykh form Cu, Zn i Mn v pochvakh goroda Blagoveshchensk (Amurskaya oblast) [The content of various forms of Cu, Zn and Mn in the soils of the city of Blagoveshchensk (Amur Region)]. *Vestnik DVO RAN*, 2013, no. 5, pp. 69–76.
- Guseva N.V., Vorobyova D.A., Evtyugina Z.A. Peculiarities of interaction in the water–rock system in the catchment area of Lake Imandra (Kola Peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 177–188. In Rus.
- Vorobyova D.A., Guseva N.V. Geochemical characteristics of soils in a territory with a high aerotechnogenic load). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 149–159. In Rus.
- Pacyna E.G., Pacyna J.M., Fudala J., Strzelecka-Jastrzab E., Hlawiczka S., Panasiuk D., Nitter S., Pregger T., Pfeiffer H., Friedrich R. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe. *Atmospheric Environment*, 2007, vol. 41, no. 38, pp. 8557–8566.
- Nezhada M.T.K., Tabatabaii S.M., Gholami A. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 152, pp. 91–109.
- Elsukova E.Yu., Opekunova M.G., Guardians A.Yu. Technogenic transformation of heavy metal fluxes in soils in the zone of influence of copper-nickel production. *International Research Journal*, 2019, vol. 12-1 (90), pp. 118–124. In Rus.
- Adlane B., Xu Z., Xu X., Liang L., Han J., Qiu G. Evaluation of the potential risks of heavy metal contamination in rice paddy soils around an abandoned Hg mine area in Southwest China. *Acta Geochimica*, 2020, vol. 39, pp. 85–95.
- Zvolinsky V.P., Kapralova D.O., Levashova E.A. Geostatistical analysis of the spatial distribution of persistent organic pollutants in the soils of Moscow within the Moscow ring road. *Monitoring. Science and Technology*, 2019, vol. 4, pp. 36–49. In Rus.
- Kharina G.V., Aleshina L.V. Accumulation of heavy metals in the soils of the Sverdlovsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 173–183.
- Gosudarstvenny doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Respubliki Sakha (Yakutiya) v 2021 godu [State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2021]. Yakutsk, 2022. 776 p.
- Legostaeva Ya., Gololobova A. Long-term geochemical monitoring of the soil cover in the impact zone of diamond mining enterprises: a case study in the Nakyn kimberlite field, Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, vol. 193, no. 6, 337.
- Gololobova A.G. Ecogeochemical monitoring of soil cover at diamond mining sites in Western Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 146–157.
- Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A., Makarov V.S., Boeskorov V.S., Grigoriev S.E. Ecological problems of the Verkhoyansk region. *Vestnik NEFU*, 2018, vol. 6 (68), pp. 18–33. In Rus.
- Danilov P.P., Legostaeva Ya.B., Savvinov G.N. Technogenic landscapes and their influence on the natural soil cover of Western Yakutia. *Vestnik NEFU*, 2005, vol. 2, no. 3, pp. 70–75. In Rus.
- Khovanskaya M.A., Kosinova I.I. Influence of mining and processing activities on the soils of the Aikhal region (Sakha-Yakutia). *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*, 2010, vol. 1, pp. 282–285. In Rus.
- Shadrinova O.V. K voprosu zasoleniya pochv na territorii almazodobychi (Zapadnaya Yakutiya) [On the issue of soil salinization in the territory of diamond mining (western Yakutia)]. *Pochva kak svyazuyushchee zveno funktsionirovaniya prirodnykh i antropogenno-preobrazovannykh ekosistem* [Soil as a connecting link in the functioning of natural and anthropogenically transformed ecosystems]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2021. pp. 564–567.

17. Acosta J.A., Faz A., Martínez-Martínez S., Zornoza R., Carmona D.M., Kabas S. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, vol. 109, no. 1–3, pp. 8–17.
18. Markus J., McBratney A.B. A review of the contamination of soil with lead: II. Spatial distribution and risk assessment of soil lead. *Environmental International*, 2001, vol. 27, pp. 399–411.
19. *JV Udachninsky GOK AK «ALROSA» (PJSC). Monitoring of sustainable development*. Available at: <https://monitoring-esg.ru/esg-analitika/analitika-po-kompaniyam/sp-ak-alrosa-pao-udachninskij-gorno-obogatitelnyj-kombinat> (1 October 2022).
20. Legostaeva Ya.B., Popov V.F., Ksenofontova M.I. Hydrogeological conditions and geocological situation in the territory of underground technogenic storage facilities during the disposal of drainage brines of the Udachny Mining and Processing Plant. *National Geology*, 2018, vol. 3, pp. 93–102. In Rus.
21. Legostaeva Ya.B. *Prostranstvennaya i vnutriprofilnaya differentsiatsiya merzlotnykh pochv severo-zapadnoy Yakutii*. Diss. Kand. nauk [Spatial and intraprofile differentiation of permafrost soils in northwestern Yakutia]. Cand. Diss.]. Ulan-Ude, 2005. 143 p.
22. Mironova S.I. *Rastitelnye suksessii na prirodno-tekhnogennykh landshaftakh Zapadnoy Yakutii i ikh optimizatsiya* [Plant successions in the natural-technogenic landscapes of Western Yakutia and their optimization]. Moscow, Academy of Natural History Publ. House, 2016. 140 p.
23. Sivtsev T.D., Nekrasov I.A., Shrain N.I. *Atlas Yakutskoy ASSR* [Atlas of the Yakut ASSR]. Moscow, Glavnoe upravlenie Geodezii i kartografii pri Sovete ministrov SSSR Publ., 1981. 40 p.
24. Šmejkalová M., Mikanová O., Borůvka L. Effects of heavy metal concentrations on biological activity of soil micro-organisms. *Plant, Soil and Environment*, 2003, vol. 49, pp. 321–326.
25. Aitchison J. *The statistical analysis of compositional data*. London, U.K., Chapman and Hall, 1986. 416 p.
26. Aitchison J. *The statistical analysis of compositional data*. Caldwell, NJ, USA, Blackburn Press, 2003. 460 p.
27. Pawlowsky-Glahn V., Buccianti, A. *Compositional data analysis: theory and applications*. Chichester, UK; West Sussex, UK, Wiley, 2011. 819 p.
28. Motyka O., Pavlíková I., Bitta J., Frontasyeva M., Jančík P. Moss biomonitoring and air pollution modelling on a regional scale: delayed reflection of industrial pollution in moss in a heavily polluted region. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 32569–32578.
29. Mullineaux S.T., McKinley J.M., Marks N.J., Scantlebury D.M., Doherty R. Heavy metal (PTE) ecotoxicology, data review: traditional vs. a compositional approach. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 769, pp. 145246.
30. Reimann C., Filzmoser P., Fabian K., Hron K., Birke M., Demetriades A., Dinelli E., Ladenberger A. The concept of compositional data analysis in practice – Total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe. *Science of The Total Environment*, 2012, vol. 426, pp. 196–210.
31. Lawley C. Compositional symmetry between Earth's crustal building blocks. *Geochemical Perspectives Letters*, 2016, vol. 2 (2), pp. 117–126.
32. Loska K., Wiechula D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment international*, 2004, vol. 30, pp. 159–165.
33. Huang S., Tu J., Liu H., Hua M., Liao Q., Feng J., Weng Z., Huang G. Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China. *Atmospheric Environment*, 2009, vol. 43, pp. 5781–5790.
34. Yuan G., Sun T., Han P., Li J., Lang X. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 136, pp. 40–47.
35. Celine S.L., Xiangdong L., Wenzhong S., Sharon C., Iain T. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics. *The Science of the Total Environment*, 2006, vol. 356, pp. 45–61.
36. Prokhorova N.V. Ekologo-geokhimicheskaya rol avtotransporta v usloviyakh gorodskoy sredy [Ecological and geochemical role of motor transport in urban environment]. *Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaya seriya*, 2005, vol. 5 (39), pp. 188–199.
37. Álvarez E., Monterroso C., Fernández M.M.L. Aluminium fractionation in Galician (NW Spain) forest soils as related to vegetation and parent material. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 166, pp. 193–206.
38. Sun C., Liu J., Wang Y., Sun L., Yu H. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China. *Chemosphere*, 2013, vol. 92, pp. 517–523.
39. Vorobeva K.Yu., Prokhorova N.V. Osobennosti zagryazneniya medyu pochv obektov grazhdanskogo stroitelstva v Samarskoy oblasti [Features of copper pollution of soils of civil engineering facilities in the Samara region]. *Ekologicheskij sbornik 7: Trudy molodykh uchenykh* [Ecological collection 7: Proceedings of young scientists]. Tolyatti, IEVB RAS, Anna Publ., 2019. pp. 115–116.
40. Li X., Liu L., Wang Y., Luo G., Chen X., Yang X., Hall M.H.P., Guo R., Wang H., Cui J., He X. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China. *Geoderma*, 2013, vol. 192, pp. 50–58.
41. Zhao Y., Wang Z., Sun W., Huang B., Shi X., Ji J. Spatial interrelations and multiscale sources of soil heavy metal variability in a typical urban–rural transition area in Yangtze River Delta region of China. *Geoderma*, 2010, vol. 156, pp. 216–227.
42. Karpichenko A.A. Ispolzovanie statisticheskikh metodov dlya vyavleniya osobennostey nakopleniya tyazhelykh metallov v poverhnostnykh gorizontah pochv [The use of statistical methods to identify the features of the accumulation of heavy metals in the surface horizons of soils]. *Sovremennye napravleniya razvitiya fizicheskoy geografii: nauchnye i obrazovatelnye aspekty v tselyakh ustoychivogo razvitiya* [Modern trends in the development of physical geography: scientific and educational aspects for sustainable development]. Minsk, Belarusian State University Publ., 2019. pp. 127–130.
43. Dordevic D., Mihajlidi-Zelic A., Relic D. Differentiation of the contribution of local resuspension from that of regional and remote sources on trace elements content in the atmospheric aerosol in the Mediterranean area. *Atmospheric Environment*, 2005, vol. 39, pp. 6271–6281.
44. Šajin R., Aliu M., Stafilov T., Alijagić J. Heavy metal contamination of topsoil around a lead and zinc smelter in Kosovska Mitrovica/Mitrovicë, Kosovo/Kosovë. *Journal Geochemical Exploration*, 2013, vol. 134, pp. 1–16.
45. Rodriguez J.A., Nanos N., Grau J.M., Gil L., Lopez-Arias M. Multiscale analysis of heavy metal contents in Spanish agricultural topsoils. *Chemosphere*, 2008, vol. 70, pp. 1085–1096.
46. Vodyanitsky Yu.N. Forms of zinc in polluted soils (literature review). *Soil Chemistry*, 2010, vol. 3, pp. 293–302. In Rus.
47. Grinvud N., Ermscho A. *Khimiya elementov* [Chemistry of elements]. Moscow, Binom Publ., 2008. 670 p.
48. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4<sup>th</sup> ed. Roca Raton, CRS Press, 2011. 548 p.
49. Yuan G-L., Sun T-H., Han P., Li J., Lang X-X. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 136, pp. 40–47.
50. Jiries A.G., Hussein H.H., Halash Z. The quality of water and sediments of street runoff in Amman, Jordan. *Hydrological Processes*, 2001, vol. 15, pp. 815–824.
51. Bem H., Gallorini M., Rizzio E., Krzeminska M. Comparative studies on the concentrations of some elements in the urban air particulate matter in Lodz City of Poland and in Milan, Italy. *Environment International*, 2003, vol. 29, pp. 423–428.
52. Li S., Yang L., Chen L., Zhao F., Sun L. Spatial distribution of heavy metal concentrations in peri-urban soils in eastern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, pp. 1615–1627.
53. Yanin E.P. Pylevye vybrosy predpriyatij kak istochnik zagryazneniya gorodskoy sredy kadmiiem [Dust emissions from enterprises as a source of cadmium pollution of the urban environment]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorij*, 2009, vol. 1, pp. 30–35.
54. Tóth G., Hermann T., Szatmári G., Pásztor L. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 565, pp. 1054–1062.

55. Liu G., Tao L., Liu X., Hou J., Wang A., Li R. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, vol. 132, pp. 156–163.
56. Pan H., Lu X., Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: Contamination, source apportionment and spatial distribution. *Science of The Total Environment*, 2017, vol. 609, pp. 1361–1369.
57. Kostrovitsky S.I. Mineralogiya i geokhimiya kimberlitov Zapadnoy Yakutii. Diss. Dokt. nauk [Mineralogy and geochemistry of kimberlites of Western Yakutia. Dr. Diss.]. Irkutsk, 2009. 412 p.
58. Kharitonov T.V. *Almazonosnost Urala* [Diamond potential of the Urals]. Perm, Perm State national research university Publ., 2016. 1280 p.
59. Zamani A., Yaftian M.R., Parizanganeh A. Statistical evaluation of topsoil heavy metal pollution around a lead and zinc production plant in Zanjan province, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 2015, vol. 13 (4), pp. 349–361.
60. Sohrabizadeh Z., Sodaeizadeh H., Hakimzadeh M., Taghizadeh-Mehrjardi R., Ghanei Bafghi M.J. A statistical approach to study the spatial heavy metal distribution in soils in the Kushk Mine, Iran. *Geoscience Data Journal*, 2022, vol. 00, pp. 1–13.
61. Li D., Wu D., Xu F., Lai J., Li S. Assessment of soil and maize contamination by TE near a coal gangue-fired thermal power plant. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192, 541.
62. Zinchuk N.N. Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of micas minerals in kimberlites]. *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya*, 2018, vol. 2, pp. 29–39.

Received: 7 October 2022.

Reviewed: 20 November 2022.

#### Information about the authors

**Anna G. Gololobova**, Cand. Sc., senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 551.234 + 550.4 (571.64)

## ТЕРМОМИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ ДАГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ОСТРОВ САХАЛИН): ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

Ершов Валерий Валерьевич<sup>1</sup>,  
valery\_ershov@mail.ru

Никитенко Ольга Александровна<sup>1</sup>,  
nikitenko.olga@list.ru

Жарков Рафаэль Владимирович<sup>1</sup>,  
rafael\_zharkov@mail.ru

<sup>1</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,  
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

**Актуальность** исследования определяется активной эксплуатацией в настоящее время гидротермальных систем как альтернативного источника энергии, использующего возобновляемые энергетические ресурсы, для извлечения редких металлов, развития экологического, лечебно-оздоровительного и экстремального туризма. Выявление типов гидротермальных месторождений, геологических условий и закономерностей их образования и современной деятельности необходимо для правильной оценки их практического использования. На севере о. Сахалин известно Дагинское термоминеральное месторождение, гидрогеохимические особенности которого пока слабо изучены.

**Цель:** получить новые данные о физико-химических параметрах термоминеральных вод Дагинского месторождения и провести сравнительный анализ гидрогеохимических особенностей его разных участков (Северного, Центрального, Южного), а также предложить механизм, объясняющий происхождение и закономерности формирования химического состава исследуемых вод.

**Объект:** термоминеральные воды Дагинского месторождения (о. Сахалин).

**Методы.** Химико-аналитические исследования термоминеральных вод выполнены в Центре коллективного пользования Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук. Значения удельной электрической проводимости исследуемых вод определялись кондуктометрическим методом, pH – потенциометрическим методом. Поверхностные температуры вод в термоминеральных источниках измерялись с помощью цифрового термометра. Определение концентраций  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$  проводилось методом высокоэффективной жидкостной хроматографии, концентраций  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  – титриметрическим методом, концентраций  $\text{B}$  и  $\text{Si}$  – спектрофотометрическим методом. Содержание органического и неорганического углерода, а также общего азота определялось методом высокотемпературного каталитического окисления. Пластовые температуры термоминеральных вод рассчитывались с помощью гидрохимических геотермометров – K-Mg, Na-K, Mg-Li, Na-Li,  $\text{SiO}_2$ .

Представлены результаты современных гидрогеохимических исследований Дагинского месторождения, проведенных в период с 2014 по 2019 гг. Установлено, что в пределах месторождения наблюдается пространственная гидрогеохимическая неоднородность, которая выражается в различии физико-химических показателей термоминеральных вод – поверхностных температур, величине общей минерализации, концентрации некоторых компонентов ионно-солевого состава – на разных его участках (Северном, Центральном и Южном). Воды на трех участках имеют одинаковый Cl-Na состав, но на Южном и Центральном участках они имеют более высокие концентрации  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Si}$ , а на Северном –  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Воды источников Северного участка характеризуются также более высокой минерализацией (в 2–8 раз) и более низкими значениями поверхностных температур (в основном на 10–15 °С) по сравнению с водами источников Южного и Центрального участков. На основании полученных гидрогеохимических данных предложена модель формирования термоминеральных вод Дагинского месторождения, включающая в себя три «конечных члена». Согласно этой модели, формирование исследуемых вод происходит в результате смешения зрелых солоноватых подземных вод Северо-Сахалинского артезианского бассейна, предположительно развитых в нижней части нутовской свиты, с современными пресными метеорными водами при их инфильтрации в области питания артезианского бассейна, а также солеными морскими водами Ныйского залива в зоне разгрузки термоминеральных вод. Доля пресных инфильтрационных вод метеорного генезиса в термоминеральных водах может составлять от 15 до 80 %, доля морских вод – до 30 %. Существенное влияние на химический состав исследуемых вод оказывают процессы в системе «вода–порода–газ–органическое вещество»: сульфатредукция, катионный обмен и сорбция-десорбция. Расчетные пластовые температуры для Дагинского месторождения составляют преимущественно 60–100 °С, что соответствует глубине их циркуляции примерно 2–3 км.

### Ключевые слова:

термоминеральные воды, химический состав, катионный обмен, сульфатредукция, сорбция–десорбция, гидрогеохимическая модель, гидрохимические геотермометры, Сахалин.

### Введение

На территории Дальнего Востока известно большое количество минеральных источников, которые находятся в разнообразных геологических условиях. Вопросам геохимии минеральных вод этого региона посвящено значительное количество работ, например,

[1–8]. Однако генезис, геохимическая изменчивость и полезные свойства этих вод изучены пока недостаточно. Одним из интересных районов Дальнего Востока для понимания факторов, обуславливающих формирование и эволюцию химического состава минеральных вод, является о. Сахалин. Здесь установ-



лены многочисленные естественные выходы как холодных, так и термальных минеральных вод разного типа, кроме того, многие гидроминеральные месторождения здесь вскрыты поисково-разведочными скважинами. Исследуемое в настоящей работе Дагинское месторождение является одним из наиболее крупных на о. Сахалин. Оно расположено в северо-восточной части острова, на побережье Ныйского залива Охотского моря, и представлено тремя относительно обособленными группами горячих источников, из которых разгружаются подземные воды с температурой до 53 °С. На территории месторождения установлен режим особой охраны – термоминеральные источники являются памятником природы регионального значения лечебно-оздоровительного профиля [9]. В настоящее время ряд источников здесь оборудован специальными конструкциями для принятия оздоровительных ванн, которые активно используются населением. Относительная близость углеводородных залежей, перспективы использования бальнеологических и рекреационных ресурсов Дагинского месторождения обуславливают высокий интерес к проведению здесь гидрогеологических исследований [10–14]. Как правило, исследования Дагинских источников включают в себя наблюдения за химическим составом и поверхностными температурами разгружаемых термоминеральных вод, тогда как вопросы генетического происхождения этих вод практически не рассматриваются.

Цель настоящей работы – получить новые данные о физико-химических параметрах термоминеральных вод Дагинского месторождения и провести сравнительный анализ гидрогеохимических особенностей его разных участков, а также предложить механизм, объясняющий происхождение и закономерности формирования химического состава исследуемых вод.

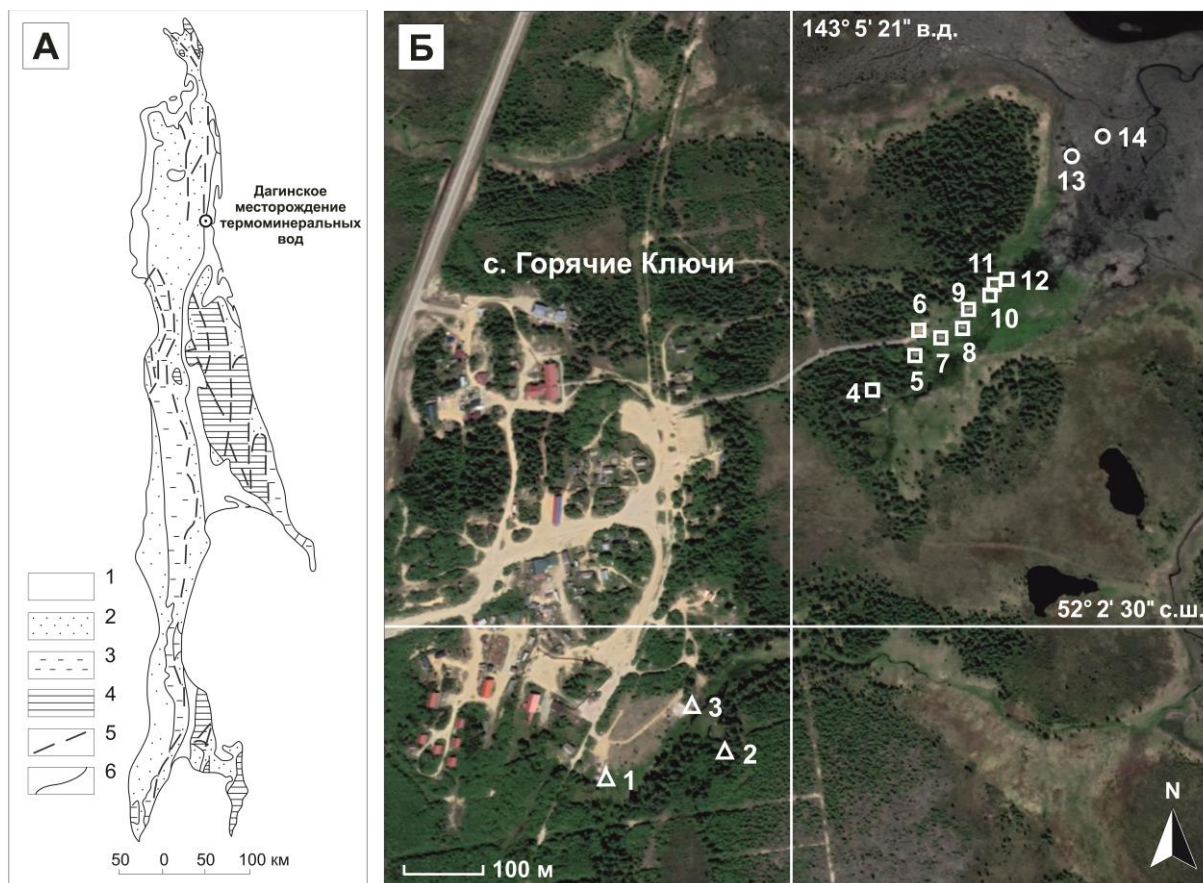
#### Объект и методы исследования

В тектоническом отношении Дагинское месторождение термоминеральных вод приурочено к восточной части Северо-Сахалинской впадины и тектонически контролируется Хоккайдо-Сахалинской системой разломов [15]. С позиции гидрогеологии рассматриваемое месторождение соответствует восточной части Северо-Сахалинского артезианского бассейна [16]. Бассейн выполнен рыхлыми и слаболигифицированными отложениями четвертичного, плиоценового и миоценового возраста, общая мощность которых составляет от 2000 до 8000 м. Фундамент бассейна представлен сильно лигифицированными образованиями верхнемелового возраста. В пределах артезианского бассейна широко распространены мощные региональные глинистые водоупорные слои (до 1 км), что обусловило его этажное строение. В восточной части бассейна в гидрогеологическом разрезе выделяют три гидрогеологических этажа: верхний этаж состоит из четвертичных и плиоценовых преимущественно песчаных отложений; средний этаж сложен песчаными отложениями средне-верхнемиоценового возраста, которые подстилаются мощной толщей глинистых отложений нижне-

среднемиоценового возраста; нижний этаж представлен песчаными нижнемиоценовыми отложениями. Верхний и средний гидрогеологические этажи в этой части бассейна разделены глинистым водоупором верхнемиоценового возраста. В свою очередь, в западной части артезианского бассейна выделяют только два гидрогеологических этажа – отложения верхнемиоценового и средне-верхнемиоценового возраста здесь включают в верхний этаж. Считается, что Дагинское месторождение приурочено к горизонтам нутовской свиты плиоценового возраста, состоящей из водоупорных глин и водоносных песчаников, общая мощность которых составляет до 3500 м [12].

Сложное гидрогеологическое строение Северо-Сахалинского артезианского бассейна обуславливает проявление выраженной гидродинамической и гидрохимической зональности на его территории [16]. В основной водосборной части бассейна развита зона свободного водообмена, в пределах которой распространены пресные гидрокарбонатно-натриевые воды. Тогда как ближе к северной части бассейна в нижней части гидрогеологического разреза – ниже плиоценового водоносного комплекса – получила развитие зона затрудненного водообмена, для которой характерны гидрокарбонатно-натриевые воды с минерализацией около 3 г/л. По мере приближения к северной и восточной окраинам артезианского бассейна в его гидрогеологическом разрезе начинают преобладать подземные воды хлоридно-натриевого состава с минерализацией преимущественно от 12 до 28 г/л, а зона пресных и солоноватых вод здесь имеет сравнительно небольшую мощность [16].

Область разгрузки термоминеральных вод представляет собой вытянутый в северо-восточном направлении (к литоральной зоне Ныйского залива) участок протяженностью примерно один километр (рис. 1). Морфологически термоминеральные источники представляют собой воронкообразные углубления диаметром от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров, из которых происходит разгрузка газоводных флюидов (рис. 2). В химическом составе свободно выделяющихся газов доминирует  $\text{CH}_4$  (до 93,7 %), в значительно меньшем количестве здесь присутствует  $\text{N}_2$  (до 9 %),  $\text{CO}_2$  (до 1 %),  $\text{C}_2\text{H}_6$  (до 0,056 %) и другие газы [17, 18]. Всего в пределах месторождения насчитывается более 60 источников [13]. На территории месторождения выделяют три участка: Южный, Центральный и Северный. Источники Северного участка расположены непосредственно в приливно-отливной зоне и периодически затопляются морскими водами Ныйского залива. Поскольку источники Южного и Центрального участков расположены на некотором удалении от литоральной зоны Ныйского залива, влияние морских вод здесь проявляется в гораздо меньшей степени. Однако многие источники Южного и Центрального участков расположены в заболоченном понижении, которое в периоды весеннего снеготаяния или интенсивных дождей заполняется пресными атмосферными осадками.



**Рис. 1.** Характеристика района исследования: А) местоположение Дагинского месторождения термоминеральных вод на о. Сахалин с указанием геологических условий по [19]: 1 – седиментитовая четвертичная надформация, 2 – литолитовая палеоген-неогеновая надформация, 3 – метаобломочнолитолитовая меловая мезаформация метаморфитовой палеозой-мезозойской надформации, 4 – метаморфитовая палеозой-мезозойская надформация, 5 – основные разрывные дислокации; 6 – стратиграфические границы геологических формаций; Б) схема расположения опробованных источников и скважин на разных участках месторождения: Южном (1 – Молодость, 2 – Здоровье, 3 – Мечта), Центральном (4 – Озерный, 5 – Александровский, 6 – Скважина № 4, 7 – Пионер, 8 – Партизан, 9 – Патриот, 10 – Питьевой, 11 – Стиральный, 12 – Трепанг) и Северном (13 – Морской-1, 14 – Морской-2)

**Fig. 1.** Characteristics of the research area: A) location of the Daginsky field of thermomineral waters on Sakhalin Island with indication of geological settings from [19]: 1 – Quaternary system, 2 – Paleogene-Neogene system, 3 – Cretaceous system, 4 – Paleozoic-Mesozoic system; 5 – main discontinuous dislocations; 6 – stratigraphic boundaries; B) schematic maps of the sampled springs and wells in different site of the field: Southern (1 – Molodost, 2 – Zdorovye, 3 – Mechta), Central (4 – Ozerny, 5 – Aleksandrovskiy, 6 – Well no. 4, 7 – Pioner, 8 – Partizan, 9 – Patriot, 10 – Pityevoy, 11 – Stiralny, 12 – Trepang), Northern (13 – Morskoy-1, 14 – Morskoy-2)

Отличительной особенностью Дагинского месторождения термоминеральных вод является наличие на его территории одноименного грязевулканического проявления, которое представлено группой небольших грифонов высотой около 25–30 см [20]. Подобные грязевые грифоны встречаются на Северном участке. Наши исследования показали, что по гидрогеохимическим параметрам Дагинское грязевулканическое проявление не соответствует типичным грязевым вулканам Земли [21]. Мы считаем, что Дагинское водогазопроводящее проявление нельзя относить к грязевым вулканам – грязевые грифоны и горячие источники на Дагинском участке имеют общий генезис и являются единой специфической гидротермальной системой.

Полевые исследования на Дагинском месторождении термоминеральных вод проводились в период с 2014 по 2019 гг. Отбор проб термоминеральных вод

осуществлялся из источников и скважин, расположенных на разных участках месторождения – Южном, Центральном и Северном (рис. 1). Измерения поверхностных температур в опробованных источниках проводились с помощью цифрового измерительного преобразователя AZ8803 Dual K Thermometer (диапазон рабочих температур от –50 до +1300 °С) с датчиком температуры КТХА 01.02-002-к1-И-Т310-3 (диапазон рабочих температур от –40 до +1000 °С). Химико-аналитические исследования термоминеральных вод проводились в Центре коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, Россия). Водородный показатель определялся с помощью рН-метра «3110 ProfiLine» (WTW, Германия). Концентрации компонентов ионно-солевого состава ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$ ) определялись методом высокоэффективной жидкостной

хроматографии на хроматографе LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором (Shimadzu, Япония). Предварительно пробы фильтровались через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм. Концентрации  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  определялись титриметрическим методом с визуальной индикацией конечной точки титрования. Измерения концентраций кремния (мономерно-димерных форм) и бора выполнялись

фотометрическим методом на спектрофотометре УФ-1200 (ТМ «Эковью», Россия). Содержание органического (TOC – total organic carbon) и неорганического (IC – inorganic carbon) углерода, а также общего азота (TN – total nitrogen) в исследуемых водах определялось методом высокотемпературного каталитического окисления на анализаторе TOC-L-CSN с приставкой TNM-L (Shimadzu, Япония).



Рис. 2. Морфология термоминеральных источников Дагинского месторождения  
Fig. 2. Morphology of thermomineral springs of the Daginsky field

#### Результаты исследования и их обсуждение

Выполненные исследования показали, что для Дагинского месторождения характерна пространственная гидрогеохимическая неоднородность, выраженная в различиях физико-химических показателей термоминеральных вод в источниках, расположенных на разных участках – Северном, Центральном и Южном. Наиболее сильно указанная неоднородность проявляется в различиях общей минерализации термоминеральных вод, значения которой варьируют от 1,3 до 11,1 г/л. Видно, что минерализация вод в источниках Центрального и Южного участков не превышает 2,6 г/л, тогда как минерализация вод в источниках Северного участка является более высокой и составляет от 5,6 до 11,1 г/л (табл. 1). Анализ литературных данных показал, что минерализация вод Дагинского месторождения может изменяться еще в более широком диапазоне – от 1,4 до 23,7 г/л [10, 14]. При этом наиболее высокий показатель минерализации, согласно этим данным, также наблюдается в источниках Северного участка. Похожая тенденция характерна для термоминеральных источников, расположенных в прибрежных морских районах [22]. Для таких районов наблюдается рост общей минерализации и концентрации ряда компонентов ионно-солевого состава разгружаемых вод по мере приближения к морскому побережью, что связывают с интрузией морских вод в термоминеральные источники.

Химический состав термоминеральных вод характеризуется практически исключительным преобладанием  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  (рис. 3), концентрации которых в зависимости от показателя общей минерализации изменяются в водах разных источников от 681 до 6297 мг/л и от 460 до 3541 мг/л соответственно. Воды, разгружающиеся на разных участках месторождения,

относятся к одному Cl–Na типу, но концентрации компонентов ионно-солевого состава в них несколько различаются. Например, воды источников Северного участка характеризуются более высокими значениями отношений  $\text{K}/\text{Cl}$ ,  $\text{Ca}/\text{Cl}$ ,  $\text{Mg}/\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ ,  $\text{Cl}/\text{B}$  по сравнению с водами источников Южного и Центрального участков. Тогда как значения отношений  $\text{Na}/\text{Cl}$ ,  $\text{HCO}_3/\text{Cl}$  и  $\text{Si}/\text{Cl}$  в водах источников Южного и Центрального участков выше, чем Северного. Таким образом, нормирование на содержание хлорид-иона показывает, что воды на Южном и Центральном участках имеют более высокие относительные концентрации  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Si}$ , а воды на Северном участке –  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{B}$ .

Как правило, в области питания артезианского бассейна, расположенной на более высоких отметках земной поверхности, происходит инфильтрация пресных атмосферных осадков. На исследуемой нами территории область питания могут быть склоны Джимдан-Дагинского поднятия, которое удаленно на несколько десятков километров к западу от Дагинских источников. Затем под влиянием разности напоров происходит миграция инфильтрационных вод в границах водоносных горизонтов к области разгрузки. При миграции химический состав этих вод относительно слабо изменяется в результате гипергенных процессов – разрушения минералов горных пород при взаимодействии с водой. В случае Дагинских источников разгрузка артезианских вод происходит в прибрежной части Ныйского залива. Следовательно, морские воды здесь оказывают значительное влияние на формирование химического состава термоминеральных вод. В этой связи наблюдаемая пространственная гидрогеохимическая неоднородность в пределах Дагинского месторождения может быть обусловлена смешением гипергенно измененных прес-

ных вод артезианского бассейна с морскими водами Ныйского залива на земной поверхности. Однако, как будет показано ниже, такая модель (с двумя «конечными членами») не позволяет объяснить наблюдаемые гидрогеохимические показатели термоминеральных источников на разных участках месторождения.

Мы полагаем, что формирование химического состава Дагинских термоминеральных вод можно удовлетворительно объяснить с помощью модели с тремя «конечными членами». Согласно данной модели, происходит смешение зрелых солоноватых подзем-

ных вод, развитых, предположительно, в нижней части нутовской свиты (первый «конечный член»), с пресными инфильтрационными водами (второй «конечный член»), а в области разгрузки происходит подмешивание в термоминеральные источники соленых морских вод Ныйского залива (третий «конечный член»). Таким образом, в качестве трех «конечных членов» нашей гидрогеохимической модели были приняты воды разного генезиса, существенно различающиеся по геохимическим показателям (табл. 2).

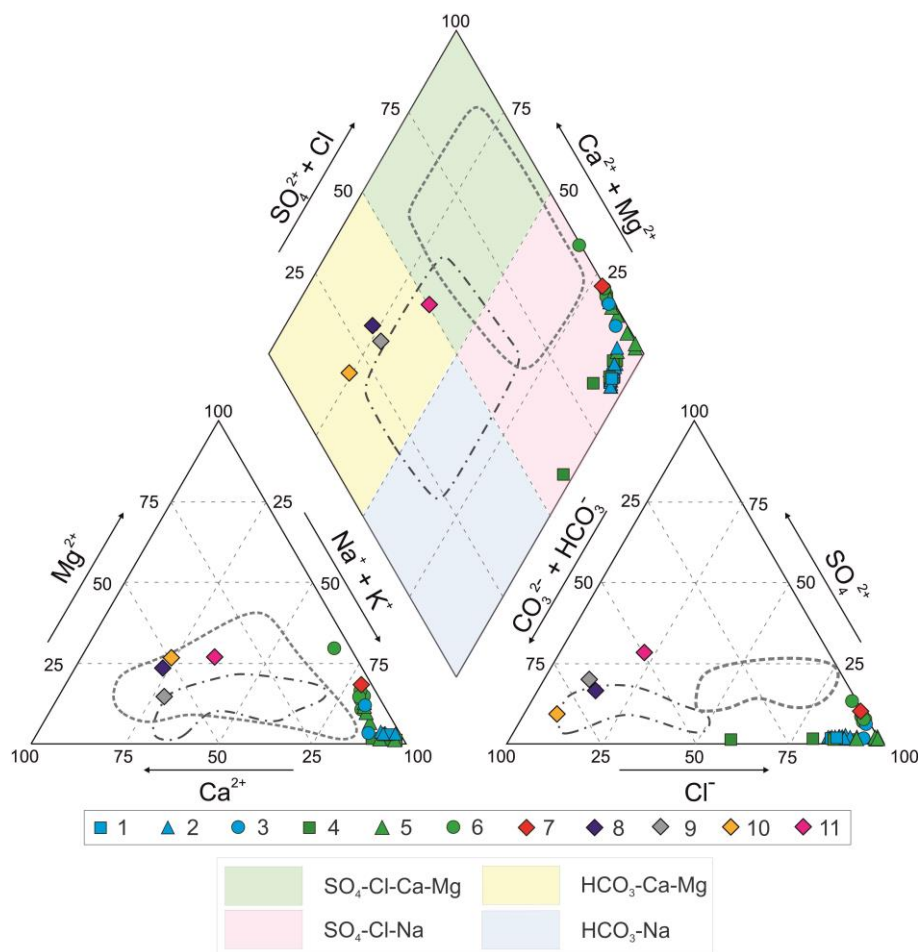
**Таблица 1.** Физико-химические параметры термоминеральных вод Дагинского месторождения на разных участках (Южный, Центральный, Северный)

**Table 1.** Physical-chemical characteristics of thermomineral waters of the Duginsky field in different site (Southern, Central, Northern)

Источник Spring	Дата отбора Sampling date	T, °C	pH	M	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Li <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	B	Si	TOC	IC	TN
Южный участок/Southern site																			
Молодость Molodost	09.06.2014	39	8,2	2,4	810	10,5	27,3	6,9	1264	305	0,5	6,5	26,5	3,2	2,6	–	–	61	<ПО
	28.03.2017	37	7,1	2,1	689	5,4	22,0	4,3	1064	285	0,1	<ПО	8,0	3,8	–	–	–	57	1,6
	07.10.2019	38	7,8	2,0	709	8,2	22,6	5,1	996	256	0,5	<ПО	20,9	2,6	2,2	14,4	0,1	56	1,5
Мечта Mechta	28.03.2017	37	7,3	2,2	746	7,1	26,0	4,2	1146	295	0,1	<ПО	8,0	4,0	–	–	–	57	1,6
	07.10.2019	37	7,5	2,2	756	8,2	26,8	5,9	1096	268	0,6	<ПО	33,6	2,9	2,2	14,8	0,8	56	1,9
Здоровье Zdorovye	28.03.2017	26	7,1	2,3	780	7,8	24,0	4,0	1227	270	0,1	<ПО	7,0	4,1	–	–	–	54	1,7
	07.10.2019	27	7,6	2,3	792	9,5	24,4	5,1	1162	268	0,2	<ПО	31,4	2,6	2,3	14,5	0,2	56	2,1
Центральный участок/Central site																			
Александровский Aleksandrovskiy	28.03.2017	40	6,9	1,4	460	3,7	22,0	2,2	720	170	0,7	<ПО	5,0	2,7	–	–	–	35	2,5
	07.10.2019	42	7,5	1,3	464	4,7	22,8	2,1	681	146	0,6	12,3	15,5	1,7	0,6	17,3	2,4	30	3,7
Партизан Partizan	28.03.2017	42	7,3	1,8	595	2,8	26,0	1,8	954	185	1,5	<ПО	2,0	3,9	–	–	–	35	1,1
	07.10.2019	39	7,3	1,8	614	3,5	28,9	2,1	930	171	1,2	2,7	7,4	2,5	1,5	14,9	1,2	35	1,0
Патриот Patriot	28.03.2017	41	6,8	1,6	546	2,9	25,0	2,4	884	170	1,1	<ПО	1,0	3,5	–	–	–	36	1,3
	07.10.2019	40	7,2	1,6	549	3,6	27,3	3,0	837	159	1,1	6,9	11,4	2,2	1,2	15,8	3,8	32	2,2
Трепанг Trepang	28.03.2017	30	7,2	2,2	732	3,2	35,0	4,8	1225	190	0,7	<ПО	2,0	4,9	–	–	–	37	1,3
Стиральный Stiralny	07.10.2019	32	7,5	2,6	885	4,4	48,7	8,6	1417	171	0,5	0,6	22,0	3,8	2,7	17,3	13,5	34	1,8
Питьевой Pitevoy	07.10.2019	35	7,5	1,7	571	3,9	26,7	5,6	873	162	0,6	0,2	9,8	2,3	1,4	14,0	14,2	34	1,8
Пионер Pioneer	28.03.2017	40	7,0	1,6	550	4,1	22,0	1,2	872	190	0,6	<ПО	3,0	3,2	–	–	–	39	1,1
	07.10.2019	40	7,3	1,6	540	5,0	24,9	1,4	816	146	5,8	14,4	15,3	2,0	0,7	17,5	–	30	4,2
Озерный Ozerny	28.03.2017	31	7,4	1,5	509	3,2	18,0	1,4	770	205	0,3	<ПО	5,0	2,5	–	–	–	39	0,8
	07.10.2019	35	7,2	1,5	525	3,8	22,0	1,5	760	183	2,6	5,1	14,5	1,6	1,0	16,0	1,6	38	1,6
Скважина № 4 Well no. 4	28.03.2017	49	7,8	2,3	770	6,2	18,0	3,0	1160	330	0,1	<ПО	5,0	3,8	–	–	–	63	2,1
	07.10.2019	47	7,9	2,3	815	8,1	20,0	3,8	1149	317	0,2	<ПО	31,8	2,9	2,4	14,8	8,9	65	2,0
Северный участок/Northern site																			
Морской-1 Morskoy-1	09.06.2014	30	7,9	5,6	1829	21,1	158,9	23,7	3397	162	10,9	<ПО	55,6	9,4	3,4	–	–	32	–
Морской-2 Morskoy-2	07.10.2019	22	7,3	11,1	3541	89,2	183,2	270,7	6297	146	570,1	<ПО	36,0	13,1	3,6	11,4	8,7	28	3,5

Примечания. <ПО – ниже предела обнаружения метода; «–» – компонент не определялся. Концентрации компонентов представлены в мг/л, концентрация Li<sup>+</sup> – в мкг/л; M (общая минерализация) – в г/л. Концентрации NO<sub>2</sub><sup>-</sup> и CO<sub>3</sub><sup>-</sup> для всех проб составляют <ПО. Местоположение источников приведено на рис. 1.

Notes. <ПО – below detection limit; «–» – the component not measured. The concentrations of the components are presented in mg/l, the Li<sup>+</sup> concentration is in µg/l, and M (total dissolved solids) – in g/l. The NO<sub>2</sub><sup>-</sup> and CO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentrations for all samples are below the detection limit. The location of the springs is shown in Fig. 1.



**Рис. 3.** Диаграмма Пайпера для термоминеральных вод Дагинского месторождения (1 – Южный участок, 2 – Центральный участок, 3 – Северный участок). Для сравнения представлены соотношения основных ионов в водах Дагинского месторождения по результатам исследований прошлых лет (4 – Южный участок, 5 – Центральный участок, 6 – Северный участок) по данным [14]; в стандартной морской воде (7) по данным [23]; в усредненной речной воде (8) по данным [24]; в дождевой воде г. Южно-Сахалинска (9); в усредненной грунтовой воде (10) по данным [25]; в усредненной подземной воде зоны гипергенеза (11) по данным [25]. Пунктирной линией обозначены области, соответствующие соотношению основных ионов в снеготалых водах о. Сахалин, штрихпунктирной – в дождевых водах о. Сахалин по данным [26]

**Fig. 3.** Piper diagram for thermomineral waters of the Daginsky field (1 – Southern site, 2 – Central site, 3 – Northern site). For comparison, the concentrations of these components in the waters of the Daginsky field (4 – Southern site, 5 – Central site, 6 – Northern site) are shown based on the results of previous years studies from [14]; in standard seawater (7) from [23]; in average river waters (8) from [24]; in rainwater (9); in average groundwater leaching (10) from [25]; in average groundwater of the hypergenesis zone (11) from [25]. The dotted line indicates the areas corresponding to the ratio of the main ions in snowmelt waters; the dash-dotted line shows the areas in rain waters from [26]

**Таблица 2.** Характеристика «конечных членов» модели формирования термоминеральных вод Дагинского месторождения

**Table 2.** Characteristics of the «end-members» of the model for the formation of thermomineral waters of the Daginsky field

«Конечный член» смешения/«End-member» of mixing	M	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Si	Li <sup>+</sup>	B
I – зрелые солоноватые подземные воды mature brackish groundwaters	2,8	920	10	36	8	1450	340	0	17	0,035	3,2
II – современные пресные метеорные воды modern fresh meteoric waters	0,15	10	3	16	4	10	80	15	8	0,004	0,05
III – морские воды/seawaters	34,7	10652	395	409	1280	19164	139	2682	2,8	0,17	4,5

Примечания. Концентрации компонентов представлены в мг/л, M (общая минерализация) – в г/л.

Notes. The concentrations of the components are presented in mg/l, M (total dissolved solids) in g/l.

Схематично предлагаемая нами модель может быть продемонстрирована на диаграммах K<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>-Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Cl<sup>-</sup>, Si-Cl<sup>-</sup>. Однако наилучшим образом процесс формирования химического состава тер-

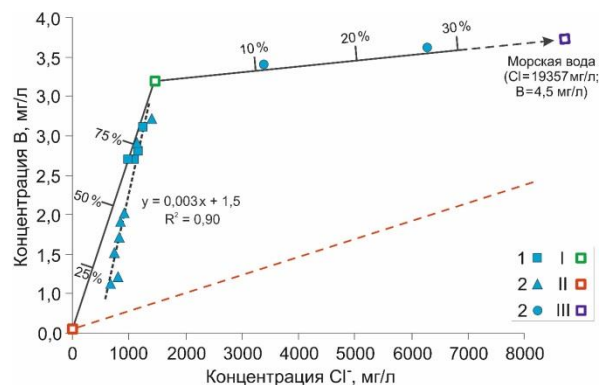
моминеральных вод Дагинского месторождения можно показать на диаграмме B-Cl<sup>-</sup>, которая позволяет оценить пропорции смешения вод, соответствующих трем «конечным членам» модели (рис. 4). На

этой диаграмме фигуративные точки, соответствующие термоминеральным источникам Южного и Центрального участков, отражают процесс смешения первого и второго «конечных членов». При этом смешение высокотемпературных зрелых подземных вод с холодными инфильтрационными водами метеорного генезиса приводит не только к очевидному снижению общей минерализации термоминеральных вод, но и к нарушению термодинамического равновесия в системе. Последнее, вероятно, оказывает существенное влияние на перераспределение бора в системе «вода–порода». Это обусловлено тем, что температурные условия выступают одним из ключевых факторов, влияющих на процессы сорбции–десорбции бора. Десорбция бора протекает с повышением температуры и полностью завершается при достижении 100 °С, тогда как его сорбция, напротив, происходит при низких температурах [27]. Таким образом, подмешивание холодных инфильтрационных вод приводит к снижению концентраций водорастворенного бора в термоминеральных водах за счет его сорбции глинистыми минералами вмещающих пород. По этой причине фигуративные точки, соответствующие термоминеральным источникам Южного и Центрального участков, несколько отклонены от модельной линии смешения первого и второго «конечных членов». В свою очередь, фигуративные точки, соответствующие термоминеральным источникам Северного участка, отражают процесс смешения второго и третьего «конечных членов». Для этих источников установлены наиболее высокие значения отношения  $Cl^-/B$  и общей минерализации по сравнению с источниками Южного и Центрального участков, где влияние морских вод является минимальным.

Видно, что доля пресных инфильтрационных вод метеорного генезиса в источниках Южного и Центрального участков может составлять от 15 до 80 %. Тогда как доля морских вод в источниках Северного участка составляет менее 30 % (рис. 4). При этом наиболее точно пропорции смешения первого и второго «конечных членов» модели, на наш взгляд, можно оценить по соотношению концентраций  $Na^+$  и  $Cl^-$  в исследуемых термоминеральных водах (рис. 5), поскольку эти ионы не только являются макрокомпонентами (т. е. присутствуют в больших концентрациях), но и в меньшей степени подвержены влиянию вторичных процессов. Согласно диаграмме  $Na^+-Cl^-$ , доля пресных вод в составе вод Южного и Центрального участков составляет, как правило, менее 50 %, что в целом не противоречит оценкам, полученным по диаграмме  $B-Cl^-$ .

Отметим, что линия смешения первого и второго «конечных членов» может быть обусловлена не только инфильтрацией пресных метеорных вод в области питания Северо-Сахалинского артезианского бассейна, но и быть результатом их непосредственного подмешивания в термоминеральные источники уже в зоне разгрузки. Учитывая, что некоторые источники расположены в заболоченном понижении, а существующий каптаж не обеспечивает им надежную изоляцию от поверхностных вод, такое предположение

является вполне допустимым. Для ответа на этот вопрос необходимы дополнительные исследования сезонных изменений химического состава термоминеральных вод, т. е. опробования Дагинских источников в период снеготаяния, засухи, дождей и др.

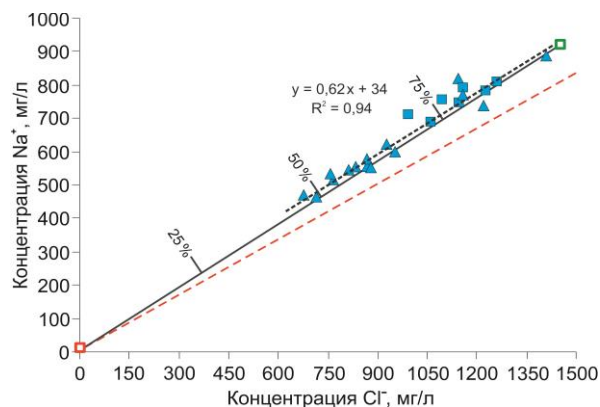


**Рис. 4.** Соотношение концентраций  $Cl^-$  и  $B$  в термоминеральных водах Дагинского месторождения (1 – Южный участок, 2 – Центральный участок, 3 – Северный участок) и предложенная модель их формирования, где I – первый «конечный член», II – второй «конечный член», III – третий «конечный член». Для сравнения красной пунктирной линией показан тренд смешения поверхностных и морских вод

**Fig. 4.** Ratio of  $Cl^-$  and  $B$  concentrations in the thermomineral waters of the Daginsky field (1 – Southern site, 2 – Central site, 3 – Northern site) and the proposed model of their formation, where I is the first «end-member», II is the second «end-member», III is the third «end-member». For comparison, the red dotted line shows the mixing trend of surface water and seawater

Остановимся подробнее на геохимической характеристике трех конечных членов предложенной модели. В качестве третьего «конечного члена» модели был принят стандартный состав морской воды [23], поскольку мы не располагаем полным набором данных по содержанию макро- и микроэлементов в водах Охотского моря. Второй «конечный член» модели соответствует современным поверхностным водам метеорного происхождения. Анализ сведений о химическом составе атмосферных осадков о. Сахалин по данным из работы [26] показал, что минерализация метеорных вод здесь не превышает 31 мг/л. Дополнительно нами был выполнен химический анализ пробы дождевых вод, отобранной в г. Южно-Сахалинск в сентябре 2018 г., по результатам которого мы получили сопоставимые данные. Однако содержание бора в нашей пробе является более высоким даже по сравнению с речными и грунтовыми водами. Мы объясняем это тем фактом, что отбор пробы производился в пределах урбанизированной территории. Известно, что химический состав атмосферных осадков при их инфильтрации в область развития подземных вод существенно изменяется за счет взаимодействия с почвенным слоем и нижележащими породами. Эти изменения будут нарастать по мере увеличения времени такого взаимодействия. Например, минерализация

природных вод, связанных с атмосферными водами поверхностного стока, последовательно увеличивается, достигая значений около 400 мг/л, согласно ряду: речные воды, грунтовые воды выщелачивания, подземные воды зоны гипергенеза [24, 25]. В этой связи для минерализации (и химического состава) второго «конечного члена» модели были взяты значения, которые лежат в промежутке между исходными атмосферными осадками и уже сильно измененными подземными водами, развитыми в зоне гипергенеза (табл. 2).



**Рис. 5.** Соотношение концентраций  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в термоминеральных водах Дагинского месторождения. Условные обозначения – на рис. 4

**Fig. 5.** Ratio of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  concentrations in the thermomineral waters of the Duginsky field. Legend is in Fig. 4

Первый «конечный член» модели представляет собой зрелые подземные воды, формирование которых происходит в результате процессов взаимодействия в системе «вода–порода–газ–органическое вещество». Эти воды являются, по нашему мнению, «истинными» Дагинскими термоминеральными водами. Мы полагаем, что они локализируются в нижней части артезианского бассейна (т. е. в условиях замедленного водообмена при достаточно высоких температурах и давлениях), находятся в термодинамическом равновесии с вмещающими породами и образованы смешением древних морских вод, сингенетичных осадочной толще, с древними инфильтрационными водами метеорного происхождения.

Эволюция осадочных бассейнов о. Сахалин включала несколько циклов субаквального и континентального развития в результате нескольких трансгрессий и регрессий моря [28]. Вследствие этого на континентальных стадиях развития изначально морских осадочных бассейнов, в том числе Северо-Сахалинского, происходило их опреснение за счет притока инфильтрационных вод метеорного происхождения. Таким образом, при захоронении осадочного материала в поровое пространство поступали морские и метеорные воды. Кроме того, Северо-Сахалинский артезианский бассейн на востоке сливается с морским седиментационным бассейном Охотского моря [16], поэтому поступление морских вод в область формирования термоминеральных вод

Дагинского месторождения может происходить и в результате конвективно-диффузионного массопереноса в соответствии с градиентом концентраций растворенных веществ [29].

Для определения генезиса природных вод часто привлекают данные о содержании стабильных изотопов кислорода и водорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ). Значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  для термоминеральных вод Дагинского месторождения находятся в интервалах  $(-15,3; -14,1)$  и  $(-106,8; -101,7)$  ‰ SMOW соответственно и хорошо ложатся на глобальную линию метеорных вод Крейга, что указывает на преимущественно метеорное происхождение этих вод [30]. В то же время разгружаемые термоминеральные воды существенно отличаются по минерализации и химическому составу от атмосферных осадков, так и от подземных вод зоны свободного водообмена (рис. 3). Это также позволяет предположить наличие некоторой доли вод морского генезиса в их составе. Исходя из концентрации  $\text{Cl}^-$ , который является консервативным анионом, предполагаемая доля морской воды в составе зрелых подземных вод примерно равна 7 %. Отметим, что такая небольшая примесь морских вод слабо скажется на первоначальном изотопном составе исследуемых вод, учитывая погрешность изотопного анализа и естественную вариабельность изотопного состава метеорных вод (например, из-за колебаний температуры воздуха). Следовательно, мы не можем здесь ожидать больших отклонений фигуративных точек от линии метеорных вод на диаграмме  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta\text{D}$ . Поэтому изотопные данные в нашем случае имеют ограниченную информативность, и мы в своих рассуждениях оперируем в основном данными о химическом составе.

Большое влияние на формирование химического состава зрелых подземных вод артезианского бассейна (первый «конечный член») оказывают процессы их взаимодействия с вмещающими породами. Известно, что состав обменных катионов осадочных пород определяется гидрохимическими условиями осадконакопления. Так, в составе сорбированных катионов пород морского происхождения, не испытавших гипергенного изменения, доминирует  $\text{Na}^+$  [31]. Этот катион преобладает в морской воде и поэтому является главным катионом в поглощающем комплексе пород. В случае поступления в бассейн пресных инфильтрационных вод происходит смещение сорбционного равновесия и вытеснение подвижных катионов из поглощающего комплекса пород в водный раствор. Катионы, обладающие большей энергией поглощения ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), вытесняют  $\text{Na}^+$  из поглощающего комплекса. Следовательно, концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  в водном растворе будут уменьшаться, а концентрация  $\text{Na}^+$ , напротив, увеличиваться. Эти обменные реакции мы видим и на современном этапе развития Дагинского месторождения – наблюдаемые концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  в термоминеральных водах Южного и Центрального участков оказываются ниже, чем это следует из расчетных значений при смешении зрелых подземных вод артезианского бассейна с пресными инфильтрационными водами, т. е. первого и второго «конечных членов». Отметим, что возмож-

ность протекания реакций катионного обмена между термоминеральными водами и илами Дагинских источников, в результате которых  $Mg^{2+}$  частично удаляется из раствора, а поглощенный  $Na^+$  илов вовлекается в раствор, рассматривалась также в работах [14, 20].

Известно, что в седиментационных бассейнах в местах естественной разгрузки метана протекает ряд микробиальных процессов по его трансформации. В частности, некоторая часть метана в анаэробной зоне осадочных отложений окисляется при участии консорциума анаэробных метанотрофных архей и сульфатредуцирующих бактерий в соответствии с реакцией [32]:



В термоминеральных водах Дагинского месторождения между концентрациями  $HCO_3^-$  и  $SO_4^{2-}$  имеется отрицательная корреляционная зависимость, для отображения которой удобно использовать линейно-логарифмическую форму (рис. 6). Коэффициент корреляции Пирсона между  $HCO_3^-$  и  $lg SO_4^{2-}$  составляет  $-0,77$ . Основным компонентом свободно выделяющихся газов Дагинских источников является  $CH_4$ , значения  $\delta^{13}C$  в котором указывают на его смешанное происхождение – в результате термогенного преобразования и анаэробного разложения органического вещества с участием сульфатредуцирующих и метанообразующих бактерий при повышенных температурах [18]. В этой связи наблюдаемое согласованное изменение концентраций  $HCO_3^-$  и  $SO_4^{2-}$  в термоминеральных водах может быть обусловлено процессом бактериального восстановления сульфатов. Кроме того, с процессом бактериальной сульфатредукции связывают образование аутигенного пирита в осадочных отложениях [33–35]. По данным [17] основным аутигенным минералом в брекчии из грязевых грифонов на Дагинском участке является фрамбоидальный пирит (до 90 % тяжелой подфракции), что также подтверждает возможность протекания здесь процессов бактериального восстановления сульфатов.

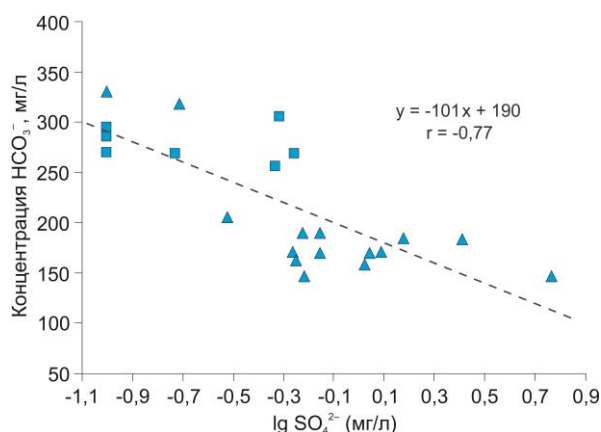


Рис. 6. Соотношение концентраций  $HCO_3^-$  и  $SO_4^{2-}$  в термоминеральных водах Дагинского месторождения. Условные обозначения – на рис. 3

Fig. 6. Ratio of  $HCO_3^-$  and  $SO_4^{2-}$  in thermomineral waters of the Daginsky field. Legend is in Fig. 3

Отношения  $Cl/B$  и  $Li/Cl$  часто используются для идентификации источников водного питания флюидных систем и интенсивности протекания процессов взаимодействия в системе «вода–порода» [36, 37]. Для термоминеральных вод Дагинского месторождения характерно обогащение бором и литием относительно морской воды (рис. 7).

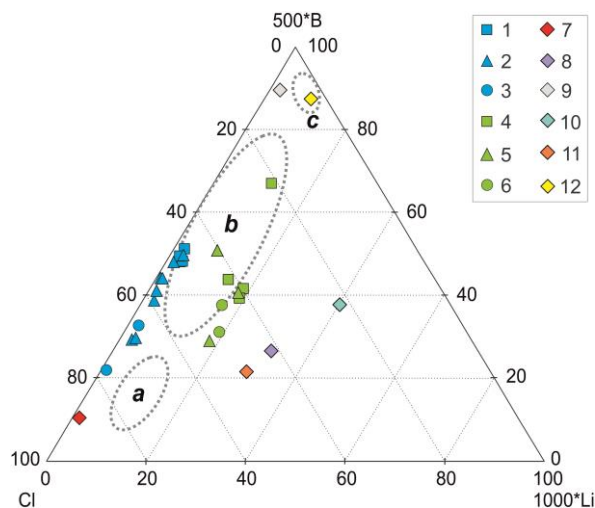


Рис. 7. Соотношения концентраций  $Cl$ ,  $B$  и  $Li$  (в мг/л) в термоминеральных водах Дагинского месторождения (1 – Южный участок, 2 – Центральный участок, 3 – Северный участок), нанесенные на диаграмму из работы [40], где а) область, соответствующая поровым водам морских осадочных отложений; б) диагенетическим водам; с) дегидратационным водам. Для сравнения показаны концентрации указанных компонентов в водах Дагинского месторождения (4 – Южный участок, 5 – Центральный участок, 6 – Северный участок) по результатам исследований прошлых лет по данным [10]; в стандартной морской воде (7) по данным [23]; в усредненной речной воде (8) по данным [24]; в дождевых водах (9); в усредненной грунтовой воде (10) по данным [25]; в усредненной подземной воде зоны гипергенеза (11) по данным [25]; в водах Южно-Сахалинского грязевого вулкана (12)

Fig. 7. Ratios of  $Cl$ ,  $B$  and  $Li$  (in mg/l) in thermomineral waters of the Daginsky field (1 – Southern site, 2 – Central site, 3 – Northern site), plotted on a diagram from [40], where a) the area corresponding to the pore waters of marine sediment deposits, b) the diagenetic waters, c) the dehydration waters. For comparison, the concentrations of these components in the waters of the Daginsky field (4 – Southern site, 5 – Central site, 6 – Northern site) are shown based on the results of previous years studies from [10]; in standard seawater (7) from [23]; in average river waters (8) from [24]; in rainwater (9); in average groundwater leaching (10) from [25]; in average groundwater of the hypergenesis zone (11) from [25]; in the waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (12)

В подземных водах седиментационных бассейнов основным источником поступления бора и лития выступают вмещающие осадочные породы, повышен-



ные содержания указанных микрокомпонентов в которых обусловлены их активной сорбцией глинистыми минералами по мере захоронения осадков [37–39]. В дальнейшем бор и литий могут переходить из минералов осадочных пород в водный раствор, что во многом зависит от температурных условий – обогащение вод этими микрокомпонентами происходит по мере повышения температуры. Таким образом, повышенные концентрации бора и лития в термоминеральных водах Дагинского месторождения относительно морской воды могут свидетельствовать о постседиментационных преобразованиях этих вод. На диаграмме Cl–B–Li видно, что между разными участками месторождения не прослеживается четкой дифференциации (рис. 7). Однако воды Северного участка в большей степени тяготеют к значениям соотношения указанных компонентов в морской воде и к области, соответствующей поровым водам морских осадочных отложений. Вероятно, это обусловлено подмешиванием к термоминеральным водам в зоне их разгрузки морских вод Ныйского залива. В то же время воды Центрального и Южного участков в большей степени стремятся к области, соответствующей диагенетическим водам. Интересно отметить также, что значения соотношений Cl/B в термоминеральных водах Дагинского месторождения значительно отличаются от аналогичных значений в водах Южно-Сахалинского грязевого вулкана, которые на данной диаграмме располагаются в области дегидратационных вод. Поэтому можно говорить о разной степени постседиментационных преобразований термоминеральных вод Дагинского месторождения и вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Это еще раз показывает, что Дагинская флюидная система по гидрогеохимическим параметрам не соответствует грязевому вулкану, несмотря на попытки некоторых авторов отождествлять эти объекты.

Важным является вопрос о локализации питающего резервуара Дагинского месторождения, глубину залегания которого можно приблизительно определить в соответствии с рассчитанными пластовыми температурами и значением геотермического градиента для исследуемой территории. Оценки пластовых температур были сделаны по гидрохимическим геотермометрам – Na-K, K-Mg, Na-Li, Mg-Li, SiO<sub>2</sub> [41–43]. Считается, что для гидротермальных систем наиболее подходящими являются K-Mg и Na-K геотермометры [41]. Значения температур формирования термоминеральных вод Дагинского месторождения, полученные по K-Mg и Na-K геотермометрам, имеют неплохую сходимость и преимущественно находятся в диапазонах 60–70 и от 70–100 °С соответственно (рис. 8). В сопоставимом диапазоне значений также были получены температуры по SiO<sub>2</sub> геотермометру, которые в основном составляют 70–85 °С. Тогда как по Na-Li и Mg-Li геотермометрам в большинстве случаев были получены некорректные значения пластовых температур – отрицательные или очень низкие положительные (преимущественно 5–10 °С), что в целом противоречит инструментально измеренным поверхностным температурам термоминеральных вод

в области их разгрузки – от 22 до 49 °С (табл. 1). Таким образом, в нашем случае целесообразно использовать Na-K, K-Mg и SiO<sub>2</sub> геотермометры. Согласно полученным температурам и геотермическому градиенту на территории северной части о. Сахалин, равному около 30 °С/км, глубина циркуляции термоминеральных вод Дагинского месторождения может составлять 2–3 км.

Отметим, что, применяя гидрохимические геотермометры для расчета пластовых температур к «истинным» Дагинским водам, мы получим значения, которые в среднем примерно на 10 °С превышают указанные выше температуры. Это вполне логично, так как примеси свежих морских и инфильтрационных метеорных вод должны несколько исказить расчетные значения пластовых температур. Поскольку эти искажения невелики, то они не имеют принципиального значения при оценке глубины залегания питающего резервуара Дагинского месторождения.

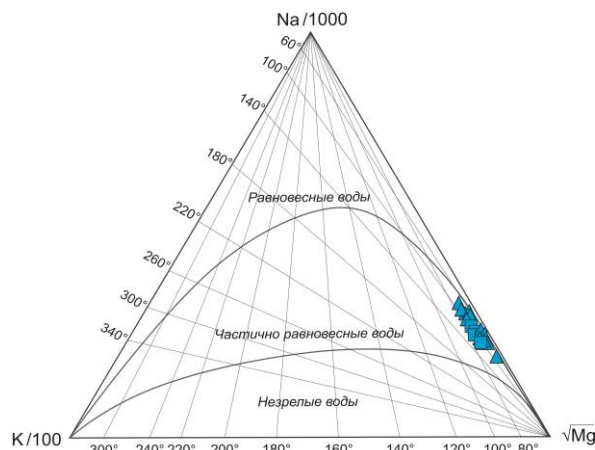


Рис. 8. Na-K-Mg треугольная диаграмма [41] с нанесением термоминеральных вод Дагинского месторождения. Условные обозначения – на рис. 3

Fig. 8. Na-K-Mg triangular diagram [41] for thermomineral waters of the Daginsky field. Legend is in Fig. 3

### Заключение

По результатам проведенных исследований были получены современные гидрогеохимические данные для Дагинского месторождения, расположенного в восточной части Северо-Сахалинского артезианского бассейна. Установлено, что Дагинские термоминеральные воды по соотношению основных катионов и анионов относятся к Cl–Na типу, общая минерализация варьирует от 1,3 до 11,1 г/л, pH – от 6,8 до 8,2, измеренные поверхностные температуры – от 22 до 49 °С. Такой широкий диапазон значений физико-химических показателей термоминеральных вод обусловлен пространственной гидрогеохимической неоднородностью – хорошо выраженными различиями этих показателей на разных участках месторождения. В частности, воды источников Южного и Центрального участков имеют более низкую минерализацию (не превышает 2,6 г/л) по сравнению с водами источников Северного участка (достигает 11,1 г/л). Источники Северного участка также характеризуются более

высокими значениями отношений  $K/Cl$ ,  $Ca/Cl$ ,  $Mg/Cl$ ,  $SO_4/Cl$ ,  $Cl/B$ , а источники Южного и Центрального участков – более высокими значениями отношений  $Na/Cl$ ,  $HCO_3/Cl$ ,  $Si/Cl$ . Кроме того, поверхностные температуры разгружаемых вод на Северном участке в основном на 10–15 °С ниже, чем на Южном и Центральном участках.

Впервые предложена гидрогеохимическая модель, которая позволяет объяснить сложный процесс формирования химического состава термоминеральных вод, обуславливающий, в том числе, наблюдаемую пространственную гидрогеохимическую неоднородность на Дагинском месторождении. Согласно этой модели, формирование термоминеральных вод происходит в результате смешения трех «конечных членов». В качестве двух «конечных членов» (второй и третий по нашей нумерации) предложенной модели взяты усредненная инфильтрационная вода метеорного происхождения и стандартная морская вода. Первый «конечный член», соответствующий, по нашему мнению, так называемым «истинным» Дагинским водам, был обоснован и установлен в результате теоретических модельных построений.

На практике второй «конечный член» модели соответствует атмосферным осадкам, которые собираются на склонах Джимдан-Дагинского поднятия и мигрируют далее в границах водоносных горизонтов от области питания к области разгрузки артезианского бассейна. Третий «конечный член» модели соответствует морским водам Ныйского залива. Первый «конечный член» представляет собой зрелые солоноватые подземные воды, локализующиеся в нижней

части Северо-Сахалинского артезианского бассейна, т. е. в условиях замедленного водообмена при достаточно высоких температурах и давлениях. Эти воды находятся в термодинамическом равновесии с вмещающими породами и были образованы в свое время при смешении древних морских вод, сингенетичных осадочной толще, с древними инфильтрационными водами метеорного происхождения.

Наблюдаемый химический состав термоминеральных вод Дагинского месторождения формируется смешением трех «конечных членов» в разных пропорциях. Смешение зрелых подземных вод артезианского бассейна с поверхностными водами метеорного происхождения происходит преимущественно при их инфильтрации в нижележащие горизонты. Подмешивание морских вод происходит в зоне разгрузки термоминеральных вод, т. е. на земной поверхности. По нашим оценкам доля пресных инфильтрационных вод метеорного генезиса в термоминеральных источниках может составлять от 15 до 80 %, а доля морских вод в них не превышает 30 %. Показано, что существенное влияние на химический состав исследуемых вод оказывают также процессы в системе «вода–порода–газ–органическое вещество»: сульфатредукция, катионный обмен и сорбция–десорбция.

По различным гидрохимическим геотермометрам сделаны оценки глубины залегания питающего резервуара Дагинского месторождения. Расчетные пластовые температуры составляют преимущественно от 60 до 100 °С, что с учетом регионального геотермического градиента соответствует глубине 2–3 км.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагин И.В., Челноков Г.А., Харитоновна Н.А. Новые изотопно-геохимические данные по термальным водам Тальского месторождения (Магаданская область) // Тихоокеанская геология. – 2021. – Т. 40. – № 6. – С. 111–119. URL: <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-6-111-119> (дата обращения 01.10.2022).
2. Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитоновна Н.А. Новые изотопно-геохимические данные по Таватумским термальным водам (Магаданская область) // Тихоокеанская геология. – 2021. – Т. 40. – № 5. – С. 104–114. URL: <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-5-104-114> (дата обращения 01.10.2022).
3. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Минеральные воды Дальнего Востока и их микроэлементный состав // Вестник ДВО РАН. – 2005. – № 3. – С. 66–75. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30793885> (дата обращения 01.10.2022).
4. Генезис и эволюция углекислых минеральных вод месторождения Мухен (Дальний Восток) / С.Л. Шварцев, Н.А. Харитоновна, О.Е. Лепокурова, Г.А. Челноков // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 1. С. 48–59. URL: <https://doi.org/10.15372/GiG20170104> (дата обращения 01.10.2022).
5. Rare-earth elements and isotopic geochemistry of thermal waters of the Okhotsk sea shore, Far East of Russia / I.V. Bragin, G.A. Chelnokov, N.A. Kharitonova, A.A. Veldemar, A.A. Pavlov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 467. – 012092. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012092> (дата обращения 01.10.2022).
6. Estimation of the deep geothermal reservoir temperature of the thermal waters of the active continental margin (Okhotsk Sea Coast, Far East of Asia) / I.V. Bragin, E.V. Zippa, G.A. Chelnokov, N.A. Kharitonova // Water. – 2021. – V. 13. – № 9. – P. 1140. URL: <https://doi.org/10.3390/w13091140> (дата обращения 01.10.2022).
7. Upwelling of deep-seated fluid in the Sikhote-Alin region, Far East of the Eurasian Plate / H. Nakamura, H. Iwamori, N. Morikawa, N. Kharitonova, G. Chelnokov, I. Bragin, Q. Chang // Aquatic Geochemistry. – 2021. – V. 27. – P. 269–282. URL: <https://doi.org/10.1007/s10498-021-09398-y> (дата обращения 01.10.2022).
8. Major and trace element geochemistry of CO<sub>2</sub>-rich groundwater in the volcanic aquifer system of the Eastern Sikhote – Alin (Russia) / N.A. Kharitonova, G.A. Chelnokov, I.V. Bragin, O.V. Chudaev, P. Shand, V.V. Funikova // Environmental Earth Sciences. – 2020. – V. 79. – P. 55. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8697-y> (дата обращения 01.10.2022).
9. ООПТ России: Решение исполнительного комитета Сахалинского областного Совета народных депутатов от 23.12.1987 № 385 «О признании достопримечательных объектов области государственными памятниками природы». URL: <http://oort.aari.ru/doc/1027?page=11&order=title&sort=asc> (дата обращения 03.10.2022).
10. Жарков Р.В. Современные физико-химические особенности термоминеральных вод Дагинского месторождения (о. Сахалин) // Мониторинг. Наука и технологии. – 2018. – № 4 (37). – С. 35–40. URL: <https://doi.org/10.25714/MNT.2018.37.004> (дата обращения 03.10.2022).
11. Жарков Р.В. Мониторинг температуры Дагинских термальных источников в 2019–2021 годах (остров Сахалин) // Мониторинг. Наука и технологии. – 2021. – № 4 (50). – С. 36–40. URL: <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.50.005> (дата обращения 03.10.2022).
12. Павлова В.Ю., Жарков Р.В. Результаты георадарных исследований на территории Дагинской гидротермальной системы (остров Сахалин) // Геосистемы переходных зон. – 2018. – Т. 2. – № 4. – С. 323–331. URL: <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.323-331> (дата обращения 03.10.2022).
13. Завадский И.Г. Разведочные работы на Дагинском месторождении термальных вод в Ногликском районе: отчет за 1990–1991 гг. – Южно-Сахалинск, Сахалингеология (Фонды ФБУ ТФГИ по Сахалинской области, инв. № 7078), 1991. – 218 с.

14. Цитенко Н.Д. Воды Дагинских горячих ключей на о. Сахалине (к вопросу о формировании химического состава хлоркальциевых вод) // Труды ВНИГРИ. – 1961. – Вып. 181. – С. 203–212.
15. Геология СССР. Т. 32. Остров Сахалин. Геологическое описание. – М.: Недра, 1970. – 432 с.
16. Гидрогеология СССР. Т. 34. Остров Сахалин. – М.: Недра, 1972. – 344 с.
17. Геохимические и минералогические особенности грязевых вулканов о-ва Сахалин / А.В. Сорочинская, Р.Б. Шакиров, А.И. Обжиров, Н.В. Зарубина, А.А. Карабцов // Вестник ДВО РАН. – 2008. – № 4. – С. 58–65.
18. Газогеохимические исследования Дагинских газогидротермальных источников на Восточном побережье о. Сахалин / Н.И. Соколова, Ю.А. Телегин, А.И. Веникова, А.И. Обжиров // Тихоокеанская геология. – 2022. – Т. 41. – № 5. – С. 82–89. URL: <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-5-82-89> (дата обращения 03.10.2022).
19. Мельников О.А., Сергеев К.Ф., Рыбин А.В., Жарков Р.В. О новом активном извержении одного из «грязевых» (газово-долитокластитовых) вулканов на Сахалине и природе грязевого вулканизма // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 400. – № 4. – С. 536–541.
20. Цитенко Н.Д. Грязевые вулканы в Дагинском районе о. Сахалина // Труды ВНИГРИ. – 1961. – Вып. 181. – С. 171–175.
21. Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин / О.А. Никитенко, В.В. Ершов // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4. – № 3. – С. 321–350. URL: <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350> (дата обращения 03.10.2022).
22. Influence of seawater intrusion on the hot springs in a coastal area: The case of the Anak-Sinchon Uplift, Korean Peninsula // R. Myongchol, G. Huaming, K. Pyol, R. Kilsang, R. Gunhyang // Journal of Hydrology. – 2022. – V. 607, – 127509. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127509> (дата обращения 03.10.2022).
23. Chester R. Trace elements in the oceans // Marine Geochemistry. – Dordrecht: Springer, 1990. – P. 346–421. URL: [https://doi.org/10.1007/978-94-010-9488-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-9488-7_11) (дата обращения 03.10.2022).
24. Кирюхин В.А., Коротков А.И., Шварцев С.Л. Гидрогеохимия. – М.: Недра, 1993. – 384 с.
25. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
26. Чудаев В.А., Чудаев О.В., Юрченко С.Г. Особенности химического состава атмосферных осадков на юге Дальнего востока // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35. – № 1. – С. 60–71.
27. Experimental study of boron geochemistry: implications for fluid processes in subduction zones / C.F. You, A.J. Spivack, J.M. Gieskes, R. Rosenbauer, J.L. Bischoff // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – № 12. – P. 2435–2442. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00137-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00137-9) (дата обращения 03.10.2022).
28. Смирнов С.И. Введение в изучение геохимической истории подземных вод седиментационных бассейнов. – М.: Недра, 1974. – 264 с.
29. Смирнов С.И. Происхождение солености подземных вод седиментационных бассейнов. – М.: Недра, 1971. – 216 с.
30. Жарков Р.В. Дагинское месторождение термоминеральных вод на севере о. Сахалин // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. – С. 285–290.
31. Самарина В.С. Гидрогеохимия. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1977. – 360 с.
32. Whiticar M.J. The Biogeochemical Methane Cycle // Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate. – Cham: Springer, 2022. – P. 1–78. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54529-5\\_5-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54529-5_5-1) (дата обращения 03.10.2022).
33. Jorgensen B.B., Isaksen M.F., Jannasch W.J. Bacterial sulfate reduction above 100 °C in deep-sea hydrothermal vent sediments // Science. – 1992. – V. 285. – P. 1756–1757. URL: <https://doi.org/10.1126/science.258.5089.1756> (дата обращения 03.10.2022).
34. Kasten S., Jorgensen B.B. Sulfate Reduction in Marine Sediments. In: Marine Geochemistry. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. – P. 263–281. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04242-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04242-7_8) (дата обращения 03.10.2022).
35. Evidence for methane seepage in South Atlantic from the occurrence of authigenic gypsum and framboidal pyrite in deep-sea sediments / R.C. Dantas, M.B. Hassan, F.W. Cruz, L. Jovane // Marine and Petroleum Geology. – 2022. – V. 142. – 105727. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105727> (дата обращения 03.10.2022).
36. Reyes A.G., Trompeter W.J. Hydrothermal water-rock interaction and the redistribution of Li, B and Cl in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // Chemical Geology. – 2012. – V. 314–317. – P. 96–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.002> (дата обращения 03.10.2022).
37. Boron isotope geochemistry during diagenesis. Part I. Experimental determination of fractionation during illitization of smectite / L.B. Williams, R.L. Hervig, J.R. Holloway, I. Hutcheon // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2001. – V. 65. – № 11. – P. 1769–1782. URL: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00557-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00557-9) (дата обращения 03.10.2022).
38. The influence of organic matter on the boron isotope geochemistry of the gulf coast sedimentary basin, USA / L.B. Williams, R.L. Hervig, M.E. Wieser, I. Hutcheon // Chemical Geology. – 2001. – V. 174. – № 4. – P. 445–461. URL: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00289-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00289-8) (дата обращения 03.10.2022).
39. Evidence of hydrocarbon-rich fluid interaction with clays: clay mineralogy and boron isotope data from Gulf of Cadiz Mud Volcano Sediments / R. Martos-Villa, M.P. Mata, L.B. Williams, F. Nieto, X.A. Rey, C.I. Sainz-Diaz // Minerals. – 2020. – V. 10. – № 8. – P. 1–25. URL: <https://doi.org/10.3390/min10080651> (дата обращения 03.10.2022).
40. Geochemical features and genetic process of hot-spring waters discharged from deep hot-spring wells in the Miyazaki Plain, Kyushu Island, Japan: diagenetic dehydrated fluid as a source fluid of hot-spring water / S. Ohsawa, K. Amata, M. Yamada, T. Mishima, K. Kazahaya // Journal Hot Spring Science. – 2010. – V. 59. – P. 295–319.
41. Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1988. – V. 52. – № 12. P. 2749–2765. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3) (дата обращения 03.10.2022).
42. Kharaka Y.K., Mariner R.H. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins // Thermal History of Sedimentary Basins, Methods and Case Histories. – New York: Springer, 1989. – P. 99–117. URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0_6) (дата обращения 03.10.2022).
43. Fournier R.O., Potter R.W. II. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer // Geothermal Resources Council Bulletin. – 1982. – V. 11. – P. 3–12.

Поступила: 05.10.2022 г.

Прошла рецензирование: 06.11.2022 г.

#### Информация об авторах

**Ершов В.В.**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела исследования вещественного состава геосфер Центра коллективного пользования Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

**Никитенко О.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник отдела исследования вещественного состава геосфер Центра коллективного пользования Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

**Жарков Р.В.**, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

UDC 551.234 + 550.4 (571.64)

## THERMOMINERAL WATERS OF THE DAGINSKY FIELD (SAKHALIN ISLAND): PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERISTICS AND FORMATION CONDITIONS

Valery V. Ershov<sup>1</sup>,  
valery\_ershov@mail.ru

Olga A. Nikitenko<sup>1</sup>,  
nikitenko.olga@list.ru

Rafael V. Zharkov<sup>1</sup>,  
rafael\_zharkov@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Science,  
1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the current active exploitation of hydrothermal systems as an alternative energy source using renewable energy resources, for the extraction of rare metals, the development of ecological, health-improving and extreme tourism. Identification of the types of hydrothermal fields, geological conditions and patterns of their formation and modern activity are necessary for a correct assessment of their practical use. Daginsky thermomineral field, the hydrogeochemical features of which not yet well understood, is known in the north of Sakhalin Island.

**The aim** of the work is to obtain new data on the physical-chemical parameters of thermomineral waters of the Daginsky field and to conduct a comparative analysis of the hydrogeochemical characteristics of its different sites (North, Central, South), and also to propose a model explaining the origin and patterns of formation of the chemical composition of the research waters.

**Objects:** thermomineral waters of the Daginsky field (Sakhalin Island).

**Methods.** Chemical analytical researches of the thermomineral waters were carried out at the Center for the Collective Use of the Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences. The electrical conductivity of the research waters was determined by conductometric method, pH was determined by the potentiometric method. The surface temperatures of the waters in the thermomineral springs were measured using a digital thermometer. The concentrations of Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Li<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup> were determined by the method of ion chromatography; concentrations of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> were determined by the titrimetric method; content of the boron and silicon were determined by the spectrophotometric method. The content of organic and inorganic carbon, as well as total nitrogen was determined by high-temperature catalytic oxidation. Reservoir temperatures of thermomineral waters were calculated using hydrochemical geothermometers – K-Mg, Na-K, Mg-Li, Na-Li, SiO<sub>2</sub>.

**Results.** The article presents the results of modern hydrogeochemical researches of the Daginsky field, conducted from 2014 to 2019. It has been established that spatial hydrogeochemical heterogeneity is observed on the territory of the field. This heterogeneity is expressed in the differences in the physical-chemical characteristics of thermomineral waters (the surface temperatures, the value of total dissolved solids, and the concentration of main components of the water-salt composition) in its different sites (Northern, Central and Southern). The waters in the three sites have the same Cl-Na composition, but in the Southern and Central sites they have higher concentrations of Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Si, and in the Northern – K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, B. The waters of the springs of the Northern site are also characterized by higher salinity (2–8 times) and lower values of surface temperatures (mainly by 10–15 °C) compared to the waters of the springs of the Southern and Central sites. Based on the obtained hydrogeochemical data, a model for the formation of thermomineral waters of the Daginsky field is proposed, which includes three «end members». According to this model, the formation of the research waters occurs as a result of mixing of mature brackish groundwaters of the North Sakhalin artesian basin, which are presumably developed in the lower part of the Nutovskaya suite, with modern fresh meteoric waters during their infiltration in the feeding area of the artesian basin, as well as salty sea-waters of the Nyisky Bay in the area of discharge of thermomineral waters. The share of fresh infiltration waters of meteoric genesis in thermomineral waters can range from 15 to 80 %, the share of seawaters can be up to 30 %. The processes in the «water–rock–gas–organic matter» system have a significant impact on the chemical composition of the research waters: sulfate reduction, cation exchange and sorption-desorption. Reservoir temperatures for the Daginsky field are predominantly 60–100 °C, which corresponds to a depth of about 2–3 km.

### Key words:

thermomineral waters, chemical composition, cation exchange, sulfate reduction, sorption–desorption, hydrogeochemical model, hydrochemical geothermometers, Sakhalin Island.

### REFERENCES

1. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. New isotope-geochemical data on the thermal waters of the Talskoe deposit (Magadan oblast). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2021, vol. 15, pp. 602–609. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1819714021060026> (accessed 1 October 2022).
2. Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A. New isotope-geochemical data on the Tavatum thermal waters (Magadan oblast) *Russian Journal of Pacific Geology*, 2021, vol. 15, pp. 484–494. Available at: <https://doi.org/10.1134/S181971402105002X> (accessed 1 October 2022).
3. Chudaeva V.A., Chudaev O.V. Mineral waters of the Far East and their microelement composition. *Bulletin FEB RAS*, 2017, vol. 3, pp. 66–75. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30793885> (accessed 1 October 2022).
4. Shvartsev S.L., Kharitonova N.A., Lepokurova O.E., G.A. Chelnokov Genesis and evolution of high-pCO<sub>2</sub> groundwaters of the Mukhen spa (Russian Far East). *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 1, pp. 37–46. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.12.002> (accessed 1 October 2022).
5. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., Veldemar A.A., Pavlov A.A. Rare-earth elements and isotopic geochemistry of

- thermal waters of the Okhotsk sea shore, Far East of Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 467, 012092. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012092> (accessed 1 October 2022).
6. Bragin I.V., Zippa E.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. Estimation of the deep geothermal reservoir temperature of the thermal waters of the active continental margin (Okhotsk Sea Coast, Far East of Asia). *Water*, 2021, vol. 13, no. 9, 1140. Available at: <https://doi.org/10.3390/w13091140> (accessed 1 October 2022).
  7. Nakamura H., Iwamori H., Morikawa N., Kharitonova N., Chelnokov G., Bragin I., Chang Q. Upwelling of deep-seated fluid in the Sikhote-Alin region, Far East of the Eurasian Plate. *Aquatic Geochemistry*, 2021, vol. 27, pp. 269–282. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10498-021-09398-y> (accessed 1 October 2022).
  8. Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Chudaev O.V., Shand P., Funikova V.V. Major and trace element geochemistry of CO<sub>2</sub>-rich groundwater in the volcanic aquifer system of the Eastern Sikhote-Alin (Russia). *Environmental Earth Sciences*, 2020, vol. 79, 55. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8697-y> (accessed 1 October 2022).
  9. *Osobo okhranyaemye prirodnye territorii Rossii: reshenie ispolnitelnogo komiteta Sakhalinskogo oblastnogo Soveta narodnykh deputatov ot 23.12.1987 № 385 «O priznanii dostoprimechatelykh obektov oblasti gosudarstvennymi pamyatnikami prirody»* [Specially protected natural areas of Russia: Decision of the Executive Committee of the Sakhalin Regional Council of People's Deputies dated December 23, 1987 No. 385 «On the recognition of the sights of the region as state nature monuments»]. Available at: <http://oopt.aari.ru/doc/1027?page=11&order=title&sort=asc> (accessed 3 October 2022).
  10. Zharkov R.F. Modern physicochemical features of the thermal mineral water of the Daginsky deposit (Sakhalin Island). *Monitoring. Science and Technologies*, 2018, vol. 4, no. 37, pp. 35–40. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.25714/MNT.2018.37.004> (accessed 3 October 2022).
  11. Zharkov R.F. Temperature monitoring of Daginsky thermal springs in 2019–2021 (Sakhalin island). *Monitoring. Science and Technologies*, 2021, vol. 4 (50), pp. 36–40. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.50.005> (accessed 3 October 2022).
  12. Pavlova V.Yu., Zharkov R.V. GPR surveys of the discharge zone of the Daginsky hydrothermal system (Sakhalin Island). *Geosystems of Transition Zones*, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 323–331. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.323-331> (accessed 3 October 2022).
  13. Zavadskiy I.G. *Razvedochnye raboty na Daginskom mestorozhdenii termalnykh vod v Noglikskom rayone: otchet za 1990–1991 gg.* [Exploration work at the Daginsky field of thermal waters in the Nogliki District: a report for 1990–1991]. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalingeology (Fondy FBU TFGI for the Sakhalin Region, inv. № 7078), 1991. 218 p.
  14. Tsitenko N.D. Vody Daginskikh goryachikh klyuchey na o. Sakhaline (k voprosu o formirovani khimicheskogo sostava khlorkaltsievyykh vod) [Waters of the Daginsky hot springs on the Island of Sakhalin (on the problem of formation of chemical composition of calcium chloride waters)]. *Trudy VNIGRI*, 1961, vol. 181, pp. 203–212.
  15. *Geologiya SSSR. T. 32. Ostrov Sakhalin. Geologicheskoe opisanie* [Geology of the USSR. Vol. 32. Sakhalin Island. Geological description]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 432 p.
  16. *Gidrogeologiya SSSR. T. 34. Ostrov Sakhalin* [Hydrogeology of the USSR. Vol. 34. Sakhalin Island]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 344 p.
  17. Sorochinskaya A.V., Shakirov R.B., Obzhairov A.I., Zarubina N.V., Karabtsov A.A. Gasgeochemical and mineralogical features of mud volcanoes on Sakhalin Island. *Bulletin FEB RAS*, 2008, vol. 4, pp. 58–65. In Rus.
  18. Sokolova N.L., Telegin Yu.A., Venikova A.L., Obzhairov A.I. Gas geochemical studies of the Dagi gas-hydrothermal system on the Sakhalin east coast. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2022, vol. 41, no. 5, pp. 82–89. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-5-82-89> (accessed 3 October 2022).
  19. Melnikov O.A., Sergeev K.F., Rybin A.V., Zharkov R.V. Nature of mud volcanism: Evidence from the latest active eruption of a mud (gas-water-lithoclastite) Volcano in Sakhalin. *Doklady Earth Sciences*, 2005, vol. 400, no. 1, pp. 168–172.
  20. Tsitenko N.D. Gryazeveye vulkany v Daginskom rayone o. Sakhalina [Mud volcanoes in the Daginsky area of Sakhalin Island]. *Trudy VNIGRI*, 1961, vol. 181, pp. 171–175.
  21. Nikitenko O.A., Ershov V.V. Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island. *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 321–350. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.30730/grtz.2020.4.3.321-335.336-350> (accessed 3 October 2022).
  22. Myongchol R., Huaming G., Pyol K., Kilsang R., Gunhyang R. Influence of seawater intrusion on the hot springs in a coastal area: the case of the Anak-Sinchon Uplift, Korean Peninsula. *Journal of Hydrology*, 2022, vol. 607, 127509. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127509> (accessed 3 October 2022).
  23. Chester R. Trace elements in the oceans. *Marine Geochemistry*. Dordrecht, Springer, 1990, pp. 346–421. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-94-010-9488-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-9488-7_11) (accessed 3 October 2022).
  24. Kiryukhin V.A., Korotkov A.I., Shvartsev S.L. *Gidrogeokhimiya* [Hydrogeochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 384 p.
  25. Voytkovich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. *Spravochnik po geokhimi* [Handbook of Geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 480 p.
  26. Chudaeva V.A., Yurchenko S.G., Chudaev O.V. Chemical composition of precipitation in the southern part of the Russian Far East. *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 1, pp. 58–70. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0097807808010077> (accessed 1 October 2022).
  27. You C.F., Spivack A.J., Gieskes J.M., Rosenbauer R., Bischoff J.L. Experimental study of boron geochemistry: implications for fluid processes in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 12, pp. 2435–2442. Available at: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00137-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00137-9) (accessed 3 October 2022).
  28. Smirnov S.I. *Vvedenie v izuchenie geokhicheskoy istorii podzemnykh vod sedimentacionnykh basseynov* [Introduction to the study of the geochemical history of groundwater in sedimentary basins]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 264 p.
  29. Smirnov S.I. *Proishozhdenie solenosti podzemnykh vod sedimentacionnykh basseynov* [Origin of groundwater salinity in sedimentation basins] Moscow, Nedra Publ., 1971. 216 p.
  30. Zharkov R.V. Daginskoe mestorozhdenie termomineralnykh vod na severe o. Sakhalin [Daginsky deposit of thermomineral waters in the north of Sakhalin Island]. *Prirodnye katastrofy: izuchenie, monitoring, prognoz* [Natural hazards: study, monitoring, forecast]. Yuzhno-Sakhalinsk, IMG FEB RAS Publ., 2008. pp. 285–290.
  31. Samarina V.S. *Gidrogeokhimiya* [Hydrogeochemistry]. Leningrad, Leningrad University Publ. house, 1977. 360 p.
  32. Whiticar M.J. The Biogeochemical Methane Cycle. *Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate*. Cham, Springer, 2022. pp. 1–78. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54529-5\\_5-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54529-5_5-1) (accessed 3 October 2022).
  33. Jorgensen B.B., Isaksen M.F., Jannasch W.J. Bacterial sulfate reduction above 100 °C in deep-sea hydrothermal vent sediments. *Science*, 1992, vol. 285, pp. 1756–1757. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.258.5089.1756> (accessed 3 October 2022).
  34. Kasten S., Jorgensen B.B. Sulfate reduction in marine sediments. *Marine Geochemistry*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2000. pp. 263–281. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04242-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04242-7_8) (accessed 3 October 2022).
  35. Dantas R.C., Hassan M.B., Cruz F.W., Jovane L. Evidence for methane seepage in South Atlantic from the occurrence of authigenic gypsum and framboidal pyrite in deep-sea sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, vol. 142, 105727. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105727> (accessed 3 October 2022).
  36. Reyes A.G., Trompeter W.J. Hydrothermal water-rock interaction and the redistribution of Li, B and Cl in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Chemical Geology*, 2012, vol. 314–317, pp. 96–112. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.002> (accessed 3 October 2022).
  37. Williams L.B., Hervig R.L., Holloway J.R., Hutcheon I. Boron isotope geochemistry during diagenesis. Part I. Experimental determination of fractionation during illitization of smectite. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta*, 2001, vol. 65, no. 11, pp. 1769–1782. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00557-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00557-9) (accessed 3 October 2022).
38. Williams L.B., Hervig R.L., Wieser M.E., Hutcheon I. The influence of organic matter on the boron isotope geochemistry of the gulf coast sedimentary basin, USA. *Chemical Geology*, 2001, vol. 174, no. 4, pp. 445–461. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00289-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00289-8) (accessed 3 October 2022).
  39. Martos-Villa R., Mata M.P., Williams L.B., Nieto F., Rey X.A., Sainz-Diaz C.I. Evidence of hydrocarbon-rich fluid interaction with clays: clay mineralogy and boron isotope data from Gulf of Cadiz Mud Volcano Sediments. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 8, pp. 1–25. Available at: <https://doi.org/10.3390/min10080651> (accessed 3 October 2022).
  40. Ohsawa S., Amita K., Yamada M., Mishima T., Kazahaya K. Geochemical features and genetic process of hot-spring waters discharged from deep hot-spring wells in the Miyazaki Plain, Kyushu Island, Japan: diagenetic dehydrated fluid as a source fluid of hot-spring water. *Journal Hot Spring Science*, 2010, vol. 59, pp. 295–319.
  41. Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, vol. 52, no. 12, pp. 2749–2765. Available at: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3) (accessed 3 October 2022).
  42. Kharaka Y.K., Mariner R.H. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. *Thermal History of Sedimentary Basins, Methods and Case Histories*. New York, Springer, 1989. pp. 99–117. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0_6) (accessed 3 October 2022).
  43. Fournier R.O., Potter II R.W. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 1982, vol. 11, pp. 3–12.

Received: 5 October 2022.  
Reviewed: 6 November 2022.

#### Information about the authors

**Valery V. Ershov**, Cand. Sc., leading researcher, Institute Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Science.

**Olga A. Nikitenko**, Cand. Sc., researcher, Institute Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Science.

**Rafael V. Zharkov**, Cand. Sc., leading researcher, Institute Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Science.

УДК 662.611

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КАРТОНА В СМЕСИ С КАМЕННЫМ УГЛЕМ

**Жуйков Андрей Владимирович**<sup>1,2</sup>,  
azhuikov@sfu-kras.ru

**Фетисова Ольга Юрьевна**<sup>2</sup>,  
fou1978@mail.ru

**Чичерин Станислав Викторович**<sup>3,4</sup>,  
stanislav.chicherin@vub.be

**Кузнецов Петр Николаевич**<sup>2,1</sup>,  
kpn@icct.ru

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79;

<sup>2</sup> Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН,  
Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 24.

<sup>3</sup> Брюссельский свободный университет (нидерландскоязычный),  
Бельгия, 1050, Брюссель, ул. Пляйнлаан, 2.

<sup>4</sup> Свободный университет Брюсселя (франкоязычный)  
и Брюссельский свободный университет (нидерландскоязычный),  
Бельгия, 1050, Брюссель, ул. Пляйнлаан, 2.

**Актуальность** исследования обуславливается поиском новых твердых топлив для расширения топливно-энергетического комплекса и совершенствования ресурсосберегающей и экологически безопасной энергетики.

**Цель:** комплексное исследование процесса горения картона и каменного угля, включающее определение основных характеристик горения твердоотопливных смесей, определение основных кинетических параметров и установление роли компонентов при горении смеси.

**Объект:** твердоотопливная смесь на основе каа-хемского каменного угля и картона.

**Методы.** Теплотехнические характеристики топлив определены согласно: влага аналитическая ГОСТ Р 33503-2015; зольность ГОСТ Р 55661-2013; выход летучих компонентов ГОСТ Р 55660-2013; теплота сгорания ГОСТ Р 147-2013; содержание углерода, водорода, азота ГОСТ Р 32979-2014; кислород ГОСТ Р 27313-2015; сера ГОСТ 8606-2015. Исследование процесса горения топлив осуществлено с помощью дифференциального-термического анализатора SDT Q600 (TA Instruments-Waters LLC, США). Температуры, при которых происходит воспламенение коксового остатка топлива и завершается процесс горения, были определены по методу пересечения кривых. Для определения кинетических характеристик индивидуальных топлив и топливных смесей применялся метод на основе модели Коутса-Редферна.

**Результаты.** Теплота сгорания каа-хемского угля в два раза выше, чем у картона, при этом содержание летучих у картона в 1,8 раза выше, чем у угля, что делает картон перспективным добавочным топливом. Увеличение массовой доли картона в смеси не влияет на температуру воспламенения смеси и находится около 300 °С. Добавление 25 % картона к углю положительно влияет на горение углеродного остатка угля, увеличивая максимальную скорость реакции на 30 % по сравнению с расчетными данными. Энергия активации при этом снижается на 39 %, индекс горения снижается в 2,5 раза. Результаты данного исследования могут быть применены при проектировании нового теплоэнергетического оборудования либо быть учтены при переводе котлов, сжигающих каменный уголь, на сжигание твердоотопливных смесей.

### **Ключевые слова:**

Каменный уголь, картон, биомасса, синхронный термический анализ, кинетика, Коутс–Редферн, совместное горение.

### **Введение**

Твердое ископаемое топливо остается основным энергетическим топливом при выработке тепловой и электрической энергии, поэтому переход к ресурсосберегающей и экологически безопасной теплоэнергетике – одна из основных задач для ученых всего мира [1]. Снизить потребление угля на объектах теплоэнергетики можно путем поиска новых перспективных топлив, как индивидуальных, так и комбинированных, состоящих из нескольких видов топлив, различающихся между собой по теплотехническим и физико-химическим свойствам. Индивидуальными топливами могут быть новые непроектные угли [2, 3],

разные виды биомассы, карбонизаты, отходы разных видов промышленных производств с высокой теплотой сгорания и низкой зольностью. Комбинированные топлива могут быть получены на основе углей, торфа, биомассы, твердых бытовых отходов (ТБО), иловых остатков сточных вод, гидролизного лигнина [4–6]. Как правило, ТБО состоят из отходов, таких как макулатура, пластик, текстиль. Наиболее распространенным компонентом, входящим в состав ТБО, является макулатура, которая не вся поддается переработке из-за своего химического состава, и способ для ее утилизации – это сжигание [7]. Состав ТБО в каждой стране имеет различия по компонентам, вхо-

дящим в него. Количество содержания бумажных отходов (в том числе и картона) в каждой стране может существенно различаться, например, в Австралии бумажные отходы составили 25 % от общего количества образовавшихся отходов за 2020 г.; в Пакистане всего 2,18 % за 2020 г.; в Китае за 2019 г. 16,13 %; в США за 2018 г. 18,1 % [8]. Эти данные свидетельствуют о внушительном количестве образующихся бумажных отходов в мире.

Исследовать процесс сжигания разных видов топлива можно несколькими способами. Одним из наиболее приближенных к практическому применению является способ проведения исследований непосредственно в рабочем котле, но в этом случае полученные данные будут привязаны непосредственно к данной марке котла [9–11]. Следующий способ исследования процесса горения осуществляют на экспериментальной установке или стенде, максимально приближенных к внутритопочным условиям, это позволяет установить некоторые характеристики процесса горения, например, время зажигания топливных частиц [12–15]. Широкое распространение в мировой практике исследования процессов горения разных видов твердых топлив получил термогравиметрический анализ (ТГА) [16–18]. С помощью ТГА можно разложить весь процесс горения топлива на основные его стадии, начиная с сушки топлива, выделения и горения летучих веществ и заканчивая горением коксового остатка. Условия, протекающие при горении топлива, в этом случае отличны от внутритопочных условий, но полученные результаты, такие как температуры, при которых происходит воспламенение углерода или завершается горение топлива, максимальная скорость реакции, изменение массы образца, тепловые эффекты, необходимы для определения основных кинетических характеристик топлива, для расширения научной теоретической базы, а также для проектирования новых энергетических установок.

Кинетические параметры, такие как энергия активации и предэкспоненциальный множитель, могут быть определены количественными методами по кривым ТГА. Кинетические параметры зависят от условий проведения эксперимента, величины и дисперсного состава навески, содержания влаги и скорости нагрева и других факторов, поэтому в литературе кинетические параметры одних и тех же топлив могут различаться, что затрудняет их сравнение. Одной из самых распространенных моделей по определению кинетических параметров является модель Коутса–Редферна [19–21], позволяющая определять параметры при одной скорости нагрева.

I. Voumanchar и др. [22] исследовали горение картона с высшей теплотой сгорания 13,81 МДж/кг с биомассой в массовом отношении 50/50 %, используя термогравиметрический анализ. Установлено, что картон при горении реагировал аналогично лигноцеллюлозным материалам. Температурные области, соответствующие разным стадиям горения топливной смеси, состоящей из картона и биомассы, были идентичны тем же температурным областям, что и при горении отдельных компонентов. Температурный этап

горения картона составил от 270 до 440 °С. S.D. Gunasee и др. [23] установили, что пиковая температура при горении картона составила 340 °С, температура зажигания – 327 °С. При исследовании горения картона в смеси с опилками и водой на специальном стенде, оснащенный высокоскоростной видеокамерой, установлено, что за счет низкой зольности компонентов и высокого содержания летучих веществ время задержки зажигания минимальное по сравнению с другими смесями [24].

Таким образом, можно сделать вывод, что картон является перспективной топливной добавкой к разным видам топлива за счет высокого содержания летучих веществ. Цель данной работы – комплексное исследование процесса горения картона и каменного угля, определение основных показателей и кинетики горения смесей, установление роли компонентов при горении смесей.

#### Методика исследования

*Объект исследования.* В работе исследуются каменный уголь Каа-Хемского угольного разреза (Республика Тыва, Россия), упаковочный картон и их смеси. Каа-Хемский каменный уголь используется как основное энергетическое топливо на Кызыльской ТЭЦ. Картон является распространенным представителем бытовых отходов. Изображения объектов исследования представлены на рис. 1. Для удобства обозначения каа-хемский уголь обозначили «100 % КН», картон – «100 % К». Смеси готовили в следующей массовой пропорции 75 % КН + 25 % К; 50 % КН + 50 % К и 25 % КН + 75 % К. Измерение массы при смешении компонентов топливной смеси, производили с помощью MS105du (Mettler Toledo, Швейцария).

*Подготовка топлив.* Топлива изучались после достижения ими воздушно-сухого состояния. Уголь и картон по отдельности измельчались в Retsch DM200 (Германия), далее с помощью Retsch AS200 (Германия) получена дисперсность топливных частиц 53–200 мкм.

*Теплотехнические характеристики топлив.* Для определения теплоты сгорания использовался калориметр С6000 (ИКА, Германия); для определения содержания углерода, водорода, азота – прибор Vario MACRO cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Германия); для определения влажности – анализатор влажности MA-150 (Sartorius, Германия); для определения выхода летучих веществ и зольности – муфельная печь Snol 7.2/1300 (АВ «Umega», Литва); сера определялась по ГОСТ 8606-2015; кислород рассчитывался по разности согласно ГОСТ Р 27313-2015.

*Синхронный термический анализ.* Исследование процесса горения топлив осуществлялось с применением синхронного термического анализатора SDT Q600 (США). Эксперименты проводились в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин при скорости нагрева 20 °С/мин, масса навески составляла от 5 до 6 мг. Для обработки результатов термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) применялась программа Universal Analysis 2000 (США).





a/a



б/б

**Рис. 1.** Изображения топлив: а) каа-хемский уголь; б) картон  
**Fig. 1.** Images of fuels: a) kaa-khem coal; b) cardboard

Методика обработки результатов термогравиметрии. Результаты ТГ использовались для определения основных характеристик горения, в том числе и индекса горения топлива ( $S$ ) [25–27], который определялся по формуле (1). Данная количественная характеристика применяется при анализе горючести разных видов топлив и учитывает температуру, при которой происходит воспламенение, скорости убыли массы и температуру выгорания. Высокое значение индекса горения свидетельствует о том, что топливо загорается в области более низких температур и обладает более высокой скоростью горения, что в свою очередь влияет на условия завершения процесса горения в области более низких температур. При расчете индекса горения применялись значения температуры, при которых воспламеняется углерод ( $T_{ing}$ ), и значения температуры, при которой завершается горение углерода ( $T_{bo}$ ). Температуры, при которых происходит воспламенение топлива и завершается процесс горения, определялись с помощью метода пересечения кривых [28–30].

Индекс горения рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{R_{DTG} \cdot R_{mean}}{T_{ing}^2 \cdot T_{bo}}, \quad (1)$$

где  $R_{DTG}$  – максимальная скорость убыли массы топлива, %/мин;  $R_{mean}$  – средняя скорость убыли массы топлива от воспламенения до полного выгорания его углеродного остатка, %/мин;  $T_{ing}$  и  $T_{bo}$  – температуры, соответствующие воспламенению и выгоранию углерода, °C,  $S$  – индекс горения,  $\text{мин}^{-2} \text{°C}^{-3}$ .

Анализ влияния компонентов в процессе горения смеси. Для проведения анализа влияния компонентов при горении смеси сравниваются экспериментальные (exp) и расчетные (est) данные. Расчетные данные получали с применением формулы (2) [31, 32]:

$$DTG_{расч} = x_1 DTG_1 + x_2 DTG_2, \quad (2)$$

где  $DTG_1$  и  $DTG_2$  – значения максимальной скорости убыли массы для каждого топлива ( $DTG_1$  – уголь;  $DTG_2$  – картон), %/мин;  $x_1$  и  $x_2$  – значения содержания топлив в смеси, их сумма должна быть равна единице.

Методика определения энергии активации и предэкспоненциального множителя. Энергия активации и предэкспоненциальный множитель при горении угля, картона и их смесей были определены методом Коутса-Редферна [19–21] используя уравнение (3):

$$\ln \left[ -\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left( \frac{AR}{\beta E_A} \right) - \frac{E_A}{RT}. \quad (3)$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\beta$  – скорость нагрева, град/мин;  $E_A$  – энергия активации, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К. Степень превращения вещества  $\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_f}$ , где  $m_0$  и  $m_f$  – исходная и конечная масса вещества, мг;  $m$  – масса вещества в точке измерения, мг.

Достоверность выбранного метода при определении кинетических характеристик оценивалась с помощью коэффициента корреляции ( $R^2$ ), который определяет степень линейной взаимосвязи выбранных параметров. Его значение должно быть максимально приближено к единице.

#### Результаты исследования

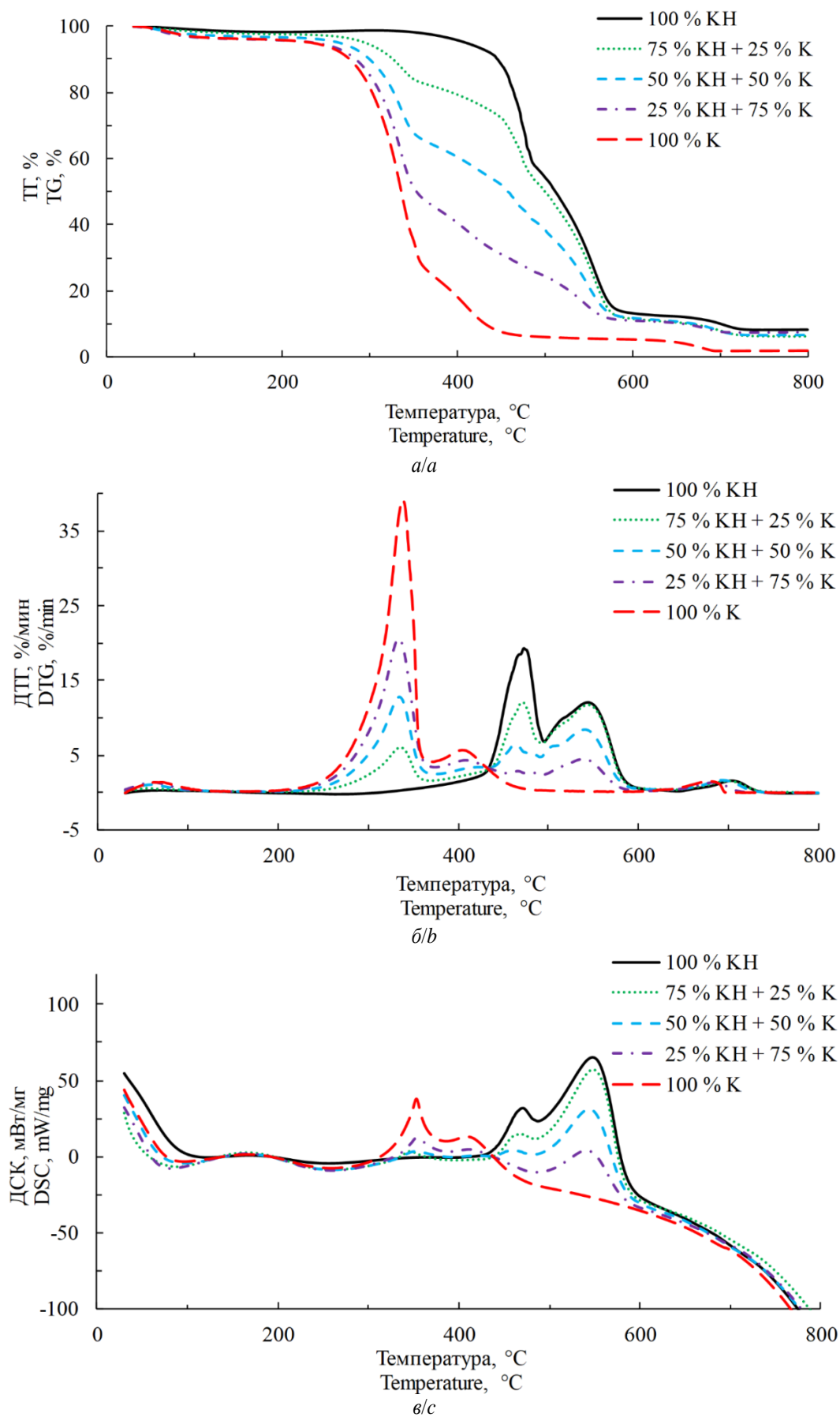
Каа-хемский каменный уголь имеет высокое содержание летучих ( $V^{daf}=46\%$ ) и высокую теплоту сгорания ( $Q^r=29,5$  МДж/кг), у картона теплота сгорания вдвое меньше, а содержание летучих веществ выше в 1,8 раз (табл. 1).

**Таблица 1.** Результаты технического и элементного анализа угля и картона

**Table 1.** Results of technical and elemental analysis of coal and cardboard

Топлива Fuels	$W^r$	$A^d$	$V^{daf}$	Элементный состав, мас. % на daf Elemental composition, wt. % on daf					$Q^r$ , МДж/кг MJ/kg
				C	H	N	S	O	
				%					
КХ	1,5	7,1	46,2	81,0	5,8	1,5	0,3	11,4	29,5
К	2,1	11,0	83,2	45,3	5,5	–	0,2	49,0	14,3

На рис. 2 представлены ТГ/ДТГ/ДСК – профили горения топлив.



**Рис. 2.** Горение угля, картона и их смесей: а) ТГ; б) ДТГ; в) ДСК  
**Fig. 2.** Combustion of coal, cardboard and their mixtures: a) TG; b) DTG; c) DSC

*Горение угля.* В процессе нагрева угля в интервале температур 30–110 °С происходит удаление влаги, сопровождаемое небольшим эндотермическим эффектом (рис. 2, в), при этом масса топлива снижается всего на 1,5 % (рис. 2, а) из-за низкого содержания влаги в угле (табл. 1). При дальнейшем нагреве до 300 °С начинается реакция окисления, при этом происходит увеличение массы угля на 0,3 % что может быть связано с сорбцией кислорода либо с химическим связыванием с образованием кислородсодержащих соединений. Этот эффект характерен для каменных углей [33]. Выделение летучих веществ начинается в интервале температур 300–430 °С, при этом происходит увеличение скорости убыли массы (рис. 2, б). Убыль массы на данном этапе горения равна 6 % (рис. 2, а). Дальнейший нагрев угля сопровождается воспламенением и горением летучих веществ, убыль массы при этом достигает 33 %. Воспламенение углерода начинается при температуре 450 °С. Максимальная скорость убыли массы составила 19,3 %/мин при температуре 470 °С (рис. 2, б), а максимальная интенсивность теплового потока 32 мВт/мг (рис. 2, в). Наибольшее снижение массы топлива происходит при сгорании углерода и составляет 46 % (рис. 2, а), при этом максимальная скорость выгорания составила 12,1 %/мин при температуре 545 °С (рис. 2, б) совместно с экзотермическим эффектом при максимальной интенсивности теплового потока 65 мВт/мг (рис. 2, в). Горение угля заканчивается догоранием особо плотного углеродистого остатка при температуре 723 °С (рис. 2, б).

*Горение картона.* При нагреве картона удаление влаги происходит с небольшим эндотермическим эффектом в том же температурном интервале, что и у угля, убыль массы составила 3,5 % (рис. 2, а, в). Горение целлюлозы, гемицеллюлозы и части лигнина при дальнейшем нагреве картона начинается при 260 °С и продолжается до 360 °С. Этот этап горения сопровождается интенсивным снижением топливной массы за счет высокого содержания летучих веществ у картона (табл. 1) и достигает 67 %. Максимальная скорость горения составила 39,1 %/мин при температуре 340 °С (рис. 2, б), а максимальная интенсивность теплового потока – 38 мВт/мг (рис. 2, в). Воспламенение углеродистого остатка у картона, происходит при температуре 300 °С. Максимальная скорость убыли массы на этапе горения углеродного остатка составила 5,6 %/мин при температуре 405 °С (рис. 2, б), убыль массы при этом составила 22,5 %. В процессе горения углеродного остатка картона максимальная интенсивность теплового потока при экзотермическом эффекте составила 13 мВт/мг (рис. 2, в). Завершение горения картона зафиксировано при температуре 692 °С.

*Горение топливных смесей.* Кривые горения топливных смесей представлены на рис. 2. Этап удаления влаги у всех трех смесей практически идентичен из-за низкой влажности компонентов смеси убыль массы при этом минимальна (рис. 2, а). Процесс горения смесей состоит из двух основных стадий. Пер-

вая стадия проходит в температурном интервале 200–420 °С, при этом сгорает целлюлоза, гемицеллюлоза и часть лигнина. Вторая стадия, связанная с горением летучих веществ и коксового остатка, проходит в широком температурном интервале – 420–720 °С (рис. 2, б). Температура воспламенения смесей примерно соответствует температуре воспламенения углеродного остатка картона (около 300 °С).

При добавлении 25 % картона к углю появляется небольшой пик с максимальной скоростью убыли массы, равной 6 %/мин, при температуре 336 °С, соответствующий горению целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина (рис. 2, б). Максимальная скорость убыли массы, соответствующая горению летучих веществ угля, снижается на 58 % по сравнению с максимумом при индивидуальном горении угля (рис. 2, б). В третьем пике ДТГ, соответствующем горению коксового остатка угля при температуре 544 °С, максимальная скорость убыли массы снизилась всего на 2,5 %. При увеличении доли картона в смеси происходит увеличение максимальной скорости убыли массы на первой стадии, а максимальная скорость убыли массы при горении коксового остатка угля снижается, также происходит снижение температуры выгорания.

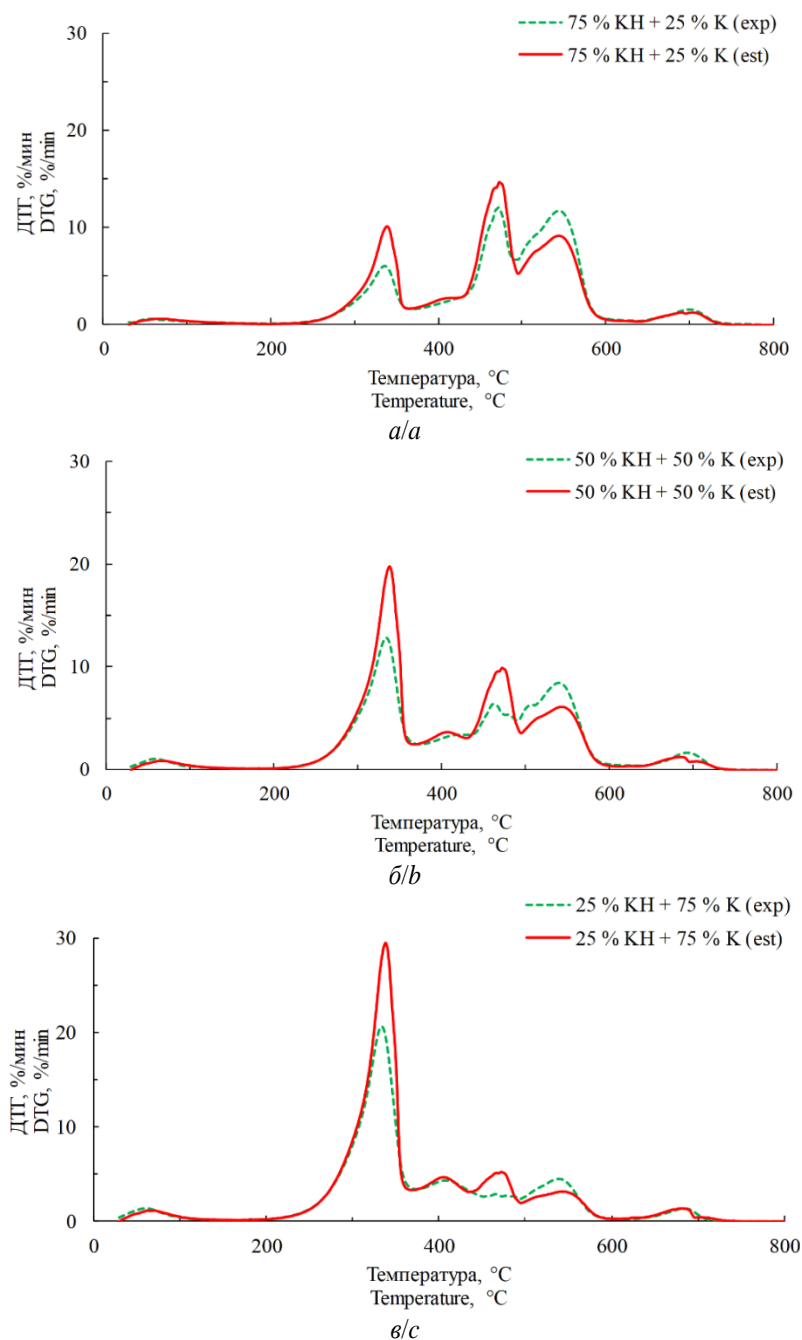
Максимальное тепловыделение при горении смеси происходит в области более высоких температур в процессе горения углеродного остатка угля при температуре около 545 °С (рис. 2, в). Увеличение массовой доли картона в смеси влияет на перераспределение экзотермических эффектов, тепловыделение при горении углерода снижается с 57 до 4 мВт/мг, а тепловыделение при горении целлюлозы, гемицеллюлозы и части лигнина увеличивается с 3 до 12 мВт/мг.

*Взаимосвязь показателей горения компонентов топливной смеси.* На рис. 3. представлено сравнение экспериментальных и расчетных значений при горении смесей. Для удобного восприятия экспериментальные значения смесей обозначались *exp*, расчетные значения смесей обозначались *est*. Сравнение экспериментальных и расчетных значений проводится с целью анализа взаимосвязи двух топлив, отличающихся друг от друга по химическому и теплотехническому составу. В случае если кривые *exp* и *est* совпадают, процесс совместного горения двух разных топлив подчиняется принципу аддитивности. Аддитивную взаимосвязь можно наблюдать в области низких температур от 30 до 200 °С (рис. 3), в этом температурном интервале профили кривых ДТГ у всех трех смесевых пропорций совпадают. Расхождение профилей кривых ДТГ *exp* и *est* свидетельствует о сложных взаимосвязях или синергетическом эффекте при горении двух разных топлив. Сложные взаимосвязи влияют в первую очередь на изменение максимальной убыли массы и температуры, соответствующих экстремумов ДТГ. Максимальная скорость убыли массы является одним из основных показателей, определяющих реакционную способность топлива, при уменьшении максимальной скорости убыли массы происходит снижение реакционной способности топлива [34].

При добавлении картона к углю (рис. 3, а) происходит снижение значений максимальной скорости убыли массы на 66 % по сравнению с расчетными в интервале температур 260–360 °С, это свидетельствует о сложных взаимосвязях летучих веществ картона и угля в процессе их совместного горения. У второго максимума ДТГ, в интервале температур 430–495 °С, также произошло снижение на 22 % по сравнению с расчетными данными (рис. 3, а). При расчетных значениях реакционная способность смеси 75 % КН + 25 % К была бы выше, чем получилось в эксперименте.

Добавление картона положительно сказывается на горении углеродного остатка угля, увеличивая экспе-

риментальные значения максимальной скорости убыли массы с 9 до 12 %/мин (рис. 3, а) при температуре 544 °С, по сравнению с расчетными. При добавлении 50 % картона в смесь этот же эффект повторяется при температуре 541 °С, увеличивая экспериментальные значения максимальной скорости убыли массы при горении углеродного остатка угля с 5,5 до 8,5 %/мин (рис. 3, б). Добавление 25 % угля к 75 % картона положительно влияет на горение углеродистого остатка угля, увеличивая экспериментальные значения максимальной скорости убыли массы с 3 до 4,5 %/мин (рис. 3, в) за счет синергетических эффектов.



**Рис. 3.** Сравнение экспериментальных и расчетных значений при горении смесей: а) 75 % КН + 25 % К; б) 50 % КН + 50 % К; в) 25 % КН + 75 % К

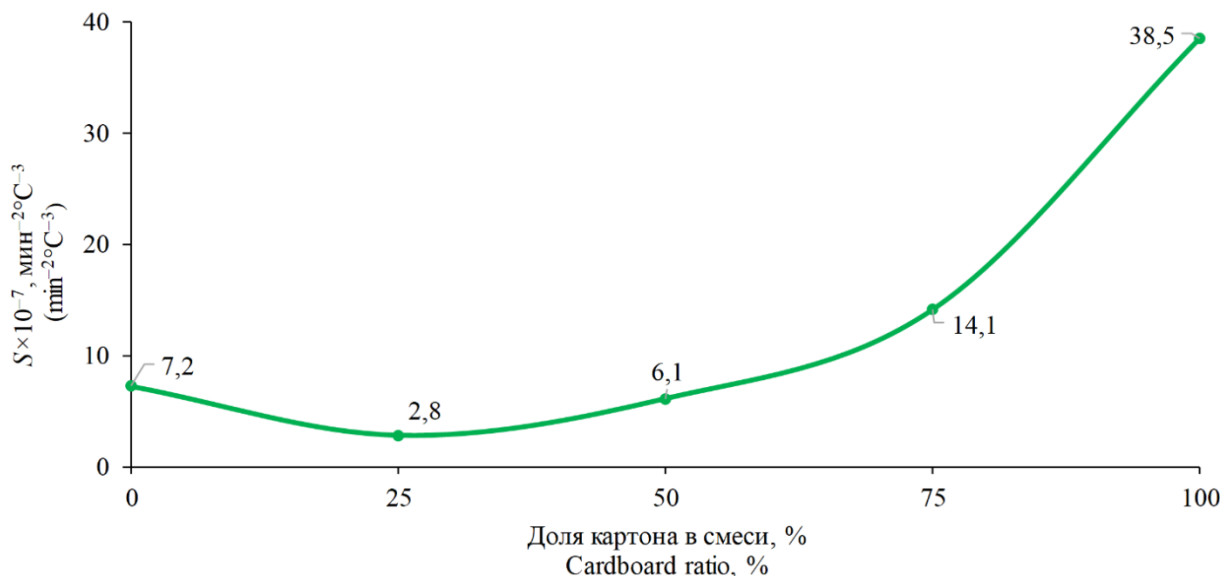
**Fig. 3.** Comparison of experimental and calculated values during combustion of mixtures: а) 75 % KH + 25 % K; б) 50 % KH + 50 % K; в) 25 % KH + 75 % K

**Кинетические параметры.** Значения энергии активации и предэкспоненциального множителя на этапе начала воспламенения углеродного остатка представлены в табл. 2. Судя по данным таблицы, при горении картона энергия активации достигает самого высокого значения, по сравнению с другими топливами, – 73 кДж/моль, уголь имеет энергию активации равную 61 кДж/моль. Добавка 25 % картона к углю снижает энергию активации возгорания смеси до 44 кДж/моль. Дальнейшее увеличение количества картона в смеси приводит к увеличению энергии активации до 60 кДж/моль.

**Таблица 2.** Кинетический анализ горения топлив и их смесей

**Table 2.** Kinetic analysis of combustion of fuels and their mixtures

Топливо Fuels	Расчетный интервал Estimated interval, °C	$E_A$ , кДж/моль kJ/mol	$A$ , $c^{-1}/s^{-1}$	$R^2$
100 % КН	400–441	61	$14 \cdot 10^6$	0,9990
75 % КН + 25 % К	250–370	44	$27 \cdot 10^6$	0,9722
50 % КН + 50 % К	250–370	54	$2 \cdot 10^6$	0,9782
25 % КН + 75 % К	250–345	60	$4 \cdot 10^5$	0,9681
100 % К	250–360	73	$3 \cdot 10^5$	0,9820



**Рис. 4.** Зависимость индекса горения от доли картона в топливной смеси

**Fig. 4.** Dependence of the combustion index on the proportion of cardboard in the fuel mixture

**Индекс горения.** Зависимость индекса горения от процентного содержания картона в топливной смеси представлена на рис. 4.

Расчет количественного показателя (индекса горения) позволяет оценить интенсивность процесса горения топлива или топливной смеси. Высокое значение индекса горения свидетельствует о воспламенении топлива в области более низких температур, о высокой максимальной скорости убыли массы, которая отображает реакционные свойства топлива, и выгорании топлива в области более низких температур. Индекс горения угля равен  $7,2 \cdot 10^{-7} \text{ мин}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$ , индекс горения картона более чем в 5 раз выше, чем у угля (рис. 4), при этом максимальная скорость убыли массы у угля в два раза меньше, чем у картона, температура воспламенения углеродистого остатка у картона на 50 % меньше, чем у угля. Высокий индекс горения картона и основные характеристики горения свидетельствуют о более интенсивном горении в области более низких температур по сравнению с углем. При добавлении до 50 % картона к углю происходит снижение индекса горения за счет снижения максимальной скорости реакции. Происходит перераспределение экстремумов ДТГ, это говорит о том, что интенсивность горения смеси ухудшится по сравнению с

углем, но в случае, если необходимо понизить температуру, при которой происходит воспламенение угля, это можно сделать путем добавления не более 25 % картона, так как последующее увеличение массовой доли картона в смеси не влияет на снижение температуры воспламенения. Добавление 25 % угля к картону снижает индекс горения по сравнению с картоном почти в 3 раза, но при этом повышает теплоту сгорания смеси на 27 % (рис. 4, табл. 1), что может быть необходимым при определенных условиях.

#### Заключение

В работе исследован процесс горения казахского угля, картона и их смесей с применением термогравиметрического анализа в окислительной среде со скоростью нагрева  $20 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Температура воспламенения углеродного остатка угля составила  $450 \text{ } ^\circ\text{C}$ , у картона –  $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Температура воспламенения топливных смесей находилась в районе  $300 \text{ } ^\circ\text{C}$  и не зависела от доли картона в смеси. При этом по мере увеличения доли картона повышался индекс горения и энергия активации и снижалась температура выгорания смеси (с  $720$  до  $700 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Добавление картона к углю оказывает положительное влияние на горение коксового остатка угля.

По результатам проведенного исследования сделан вывод, что картон целесообразно применять в виде энергетического топлива в смеси с углем на объектах теплоэнергетики, например, для снижения температу

ратуры воспламенения угля достаточно добавлять до 25 % картона.

*Работа выполнена с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An innovative low-NO<sub>x</sub> combustion technology for industrial pulverized coal boiler: gas-particle flow characteristics with different radial-air-staged levels / Z. Yuan, Z. Chen, X. Wu, N. Zhang, L. Bian, Y. Qiao, J. Li, Z. Li // *Energy*. – 2022. – V. 260. – 125142.
2. Топливные ресурсы томской области для альтернативного энергетического использования / А.С. Заворин, Т.С. Тайлашева, К.В. Буваков, А.Ю. Долгих, Е.С. Воронцова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 55–65.
3. Flour-milling waste as a potential energy source. The study of the mineral part / K. Ibraeva, R. Tabakaev, N. Yazykov, M. Rudmin, Y. Dubinin, A. Zavorin // *Fuel*. – 2021. – V. 285. – 119240.
4. Isaac K., Bada S.O. The co-combustion performance and reaction kinetics of refuse derived fuels with South African high ash coal // *Heliyon*. – 2020. – V. 6 (1). – e03309.
5. Vekemans O., Laviolette J.-P., Chaouki J. Co-combustion of coal and waste in pulverized coal boiler // *Energy*. – 2016. – V. 94. – P. 742–754.
6. Advances in biomass co-combustion with fossil fuels in the European context: a review / M. Variny, A. Varga, M. Rimar, J. Janosovský, J. Kizek, L. Lukac, G. Jablonsky, O. Mierka // *Processes*. – 2021. – V. 9 (1). – P. 1–34.
7. Malat'ak J., Velevic J., Bradna J. Specialty types of waste paper as an energetic commodity // *Agronomy Research*. – 2018. – V. 16 (2). – P. 534–542.
8. Gasification of municipal solid waste: progress, challenges, and prospects / M. Sajid, A. Raheem, N. Ullah, M. Asim, M.S. Ur Rehman, N. Ali // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – V. 168. – 112815.
9. Hlavacek O. Co-combustion of sewage sludge in the coal-fired heating plant // *Paliva*. – 2022. – V. 14 (2). – P. 74–78.
10. Stable and clean co-combustion of municipal sewage sludge with solid wastes in a grate boiler: a modeling-based feasibility study / T. Gu, W. Ma, Z. Guo, T. Berning, C. Yin // *Fuel*. – 2022. – V. 328. – 125237.
11. NO formation during co-combustion of coal with two thermally treated biomasses / T. Allguren, K. Andersson, A. Fry, E.G. Eddings // *Fuel Processing Technology*. – 2022. – V. 235. – 107365.
12. Ashraf A., Sattar H., Munir S. A comparative performance evaluation of co-combustion of coal and biomass in drop tube furnace // *Journal of the Energy Institute*. – 2022. – V. 100. – P. 55–65.
13. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, A.E. Nurpeis, E.G. Orlova, A.S. Samoilo, A.M. Zhizhaev, A.V. Zhuikov // *Fuel Processing Technology*. – 2022. – V. 236. – 107422.
14. Experimental investigation for co-combustion characteristics of semi-coke and bituminous coal in a 3 MWth tangential combustion facility / J. Guan, Q. Yu, R. Sun, T. Shen, M. Wang, Y. Yan, X. Song // *Journal of Thermal Science*. – 2020. – V. 29 (6). – P. 1655–1662.
15. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement / D.O. Glushkov, A.I. Matiushenko, A.E. Nurpeis, A.V. Zhuikov // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – V. 223. – 106986.
16. Experimental study of the processes of reducing the formation of sulfur oxides during the co-combustion of particles of metaluminous coal and wood processing waste / S.A. Yankovsky, G.V. Kuznetsov, A.A. Tolokolnikov, I.V. Cherednik, A.A. Ivanov // *Fuel*. – 2021. – V. 291. – 120233.
17. Experimental investigation on combustion characteristics and kinetics during Co-Firing bituminous coal with ultra-low volatile carbon-based solid fuels / C. Wang, C. Wang, X. Jia, X. Gao, P. Wang, Q. Feng, D. Che // *Journal of the Energy Institute*. – 2021. – V. 95. – P. 87–100.
18. Evaluation of the structural changes of a char produced by slow pyrolysis of biomass and of a high-ash coal during its combustion and their role in the reactivity and flue gas emissions / D.M. Hillig, J.G. Pohlmann, C. Manera, D. Perondi, F.M. Pereira, C.R. Altafini, M. Godinho // *Energy*. – 2020. – V. 202. – 117793.
19. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data // *Nature*. – 1964. – V. 201. – P. 68–69.
20. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal / F. Guo, Y. He, A. Hossainpour, J. Gardy, Z. Zhong // *Energy*. – 2020. – V. 197. – 117147.
21. Жуйков А.В., Фетисова О.Ю., Глушков Д.О. Термический анализ процесса горения бурого угля, сосновых опилок, картона и их смесей // *Химия твердого топлива*. – 2022. – № 4. – С. 54–61.
22. Investigation of (co)-combustion kinetics of biomass, coal and municipal solid wastes / I. Boumanchar, Y. Chhiti, F.E. Mhamdi Alaoui, M. Elkhouchi, A. Sahibed-dine, F. Bentiss, C. Jama, M. Bensitel // *Waste Management*. – 2019. – V. 97. – P. 10–18.
23. Pyrolysis and combustion of municipal solid wastes: Evaluation of synergistic effects using TGA-MS / S.D. Gunasee, M. Carrier, J.F. Gorgens, R. Mohee // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2016. – V. 121. – P. 50–61.
24. Combustion of coal flotation wastes and woodworking wastes in blends and suspensions / K.Y. Vershinina, V.V. Dorokhov, V.V. Medvedev, D.S. Romanov // *Coke and Chemistry*. – 2019. – V. 62 (5). – P. 202–209.
25. Evaluating the impact of wood sawdust and peanut shell mixing ratio on co-combustion performance / Y. Nie, M. Deng, M. Shan, X. Yang // *Fuel*. – 2022. – V. 324. – 124667.
26. Garcia E., Ejim I.F., Liu H. Thermogravimetric analysis of co-combustion of a bituminous coal and coffee industry by-products // *Thermochimica Acta*. – 2022. – V. 715. – 179296.
27. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends / S. Zheng, Y. Hu, Z. Wang, X. Cheng // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93. – P. 1373–1381.
28. Assessment of Flammulina velutipes residue as potential fuels for co-combustion with pine sawdust from characteristics of combustion process, flue gases and ashes / W. Li, Y. Huang, J. Xie, L. Lang, W. Bu, Y. Jiang, Y. Wang, X. Yin // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2021. – V. 158. – 105156.
29. Thermogravimetric investigation on co-combustion characteristics of tobacco residue and high-ash anthracite coal / X.G. Li, Y. Lv, B.G. Ma, S.W. Jian, H.B. Tan // *Bioresource Technology*. – 2011. – V. 102 (20). – P. 9783–9787.
30. Thermogravimetric investigation of hydrochar-lignite co-combustion / Z. Liu, A. Quek, S. Kent Hoekman, M.P. Srinivasan, R. Balasubramanian // *Bioresource Technology*. – 2012. – V. 123. – P. 646–652.
31. Ларина О.М., Синельщиков В.А., Сычев Г.А. Термогравиметрический анализ топливных смесей из биомассы и высокозольных углесодержащих отходов // *Теплофизика высоких температур*. – 2020. – № 5 (58). – С. 782–788.
32. Co-combustion characteristics of electrolytic aluminum waste and coal / L. Deng, Y. Qiu, J. Jiang, Z. Zhu, D. Che // *Fuel*. – 2022. – V. 325. – 124890.
33. Богомолов А.Р., Петров И.Я., Жалмагамбетова У.К. Термический анализ углей Казахстанских месторождений // *Теплоэнергетика*. – 2020. – № 3. – С. 24–32.
34. Ларина О.М., Синельщиков В.А., Сычев Г.А. Термогравиметрический анализ топливных смесей из биомассы и высокозольных углесодержащих отходов // *Теплофизика высоких температур*. – 2020. – Т.58. – № 5. – С. 782–788.

Поступила: 16.10.2022 г.

Дата рецензирования: 21.11.2022 г.

#### **Информация об авторах**

**Жуйков А.В.**, кандидат технических наук, заведующий учебно-научной лабораторией кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Политехнического института Сибирского федерального университета; научный сотрудник Института химии и химической технологии Сибирского отделения РАН.

**Фетисова О.Ю.**, кандидат химических наук, научный сотрудник Института химии и химической технологии Сибирского отделения РАН.

**Чичерин С.В.**, аспирант кафедры термо- и гидродинамики Технического факультета Брюссельского свободного университета (нидерландскоязычный); аспирант, Брюссельский институт гидротермических систем и чистой энергии Свободного университета Брюсселя (франкоязычный) и Брюссельского свободного университета (нидерландскоязычный).

**Кузнецов П.Н.**, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник Института химии и химической технологии Сибирского отделения РАН; профессор Сибирского федерального университета.

UDC 662.611

## ENERGY APPLICATION OF CARDBOARD IN MIXTURE WITH COAL

Andrey V. Zhuykov<sup>1,2</sup>,  
azhuikov@sfu-kras.ru

Olga Yu. Fetisova<sup>2</sup>,  
fou1978@mail.ru

Stanislav V. Chicherin<sup>3,4</sup>,  
stanislav.chicherin@vub.be

Petr N. Kuznetsov<sup>2,1</sup>,  
kpn@icct.ru

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Chemistry and Chemical Technology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
50, bld. 24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.

<sup>3</sup> Vrije Universiteit Brussel (VUB),  
2, Pleinlaan, Brussels, 1050, Belgium.

<sup>4</sup> Vrije Universiteit Brussel (VUB) and Université Libre de Bruxelles (ULB),  
2, Pleinlaan, Brussels, 1050 Brussels, Belgium.

**The relevance** of the study is determined by the search for new solid fuels to expand the fuel and energy complex and improve resource-saving and environmentally friendly energy.

**The main aim:** a comprehensive study of cardboard and coal combustion, including the determination of the main characteristics of the combustion of solid fuel mixtures, the determination of the main kinetic parameters and the establishment of the role of the components in the mixture combustion.

**Object:** solid fuel mixture based on Kaa-Khem coal and cardboard.

**Methods.** Thermal characteristics of fuels are determined according to: analytical moisture – SS R 33503-2015; ash content – SS R 55661-2013; yield of volatile components – SS R 55660-2013; calorific value – SS R 147-2013; content of carbon, hydrogen, nitrogen – SS R 32979-2014; oxygen – SS R 27313-2015; sulfur – SS 8606-2015. The fuel combustion was studied using an SDT Q600 differential thermal analyzer (TA Instruments-Waters LLC, USA). Ignition and burnout temperatures were determined using the curve crossing method. To determine the kinetic characteristics of individual fuels and fuel mixtures, a method based on the Coates–Redfern model was used.

**Results.** The heat of combustion of Kaa-Khem coal is twice that of cardboard, while the volatile content of cardboard is 1,8 times higher than that of coal, which makes cardboard a promising additional fuel. An increase in the mass fraction of cardboard in the mixture does not affect the ignition temperature of the mixture and is about 300 °C. The addition of 25 % cardboard to coal has a positive effect on coal carbon residue combustion, increasing the maximum reaction rate by 30 % compared to the calculated data. The activation energy in this case is reduced by 3,9 %, the combustion index is reduced by 2,5 times. The results of this study can be applied in the design of new heat and power equipment, or be taken into account when converting coal-burning boilers to burning solid fuel mixtures.

**Key words:**

Hard coal, cardboard, biomass, thermogravimetric analysis, kinetics, Coates–Redfern, co-combustion.

The research was carried out using the equipment of the Krasnoyarsk Regional Center for Collective Use of the Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**REFERENCES**

1. Yuan Z., Chen Z., Wu X., Zhang N., Bian L., Qiao Y., Li J., Li Z. An innovative low-NO<sub>x</sub> combustion technology for industrial pulverized coal boiler: gas-particle flow characteristics with different radial-air-staged levels. *Energy*, 2022, vol. 260, 125142.
2. Zavorin A.S., Tailasheva T.S., Buvakov K.V., Dolgikh A.Yu., Vorontsova E.S. Fuel resources of the Tomsk region for alternative energy use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6. pp. 55–65. In Rus.
3. Ibraeva K., Tabakaev R., Yazykov N., Rudmin M., Dubinin Y., Zavorin A. Flour-milling waste as a potential energy source. The study of the mineral part. *Fuel*, 2021, vol. 285, 119240.
4. Isaac K., Bada S.O. The co-combustion performance and reaction kinetics of refuse derived fuels with South African high ash coal. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 1, e03309
5. Vekemans O., Laviolette J.-P., Chaouki J. Co-combustion of coal and waste in pulverized coal boiler. *Energy*, 2016, vol. 94, pp. 742–754.
6. Variny M., Varga A., Rimar M., Janosovsky J., Kizek J., Lukac L., Jablonsky, G., Mierka, O. Advances in biomass co-combustion with fossil fuels in the European context: a review. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1–34.
7. Malat'ak J., Velebil J., Bradna J. Specialty types of waste paper as an energetic commodity. *Agronomy Research*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 534–542.
8. Sajid M., Raheem A., Ullah N., Asim M., Ur Rehman M.S., Ali N. Gasification of municipal solid waste: progress, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 168, 112815.
9. Hlavacek O. Co-combustion of sewage sludge in the coal-fired heating plant. *Paliva*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 74–78.



10. Gu T., Ma W., Guo Z., Berning T., Yin C. Stable and clean co-combustion of municipal sewage sludge with solid wastes in a grate boiler: a modeling-based feasibility study. *Fuel*, 2022, vol. 328, 125237.
11. Allguren T., Andersson K., Fry A., Eddings E.G. NO formation during co-combustion of coal with two thermally treated biomasses. *Fuel Processing Technology*, 2022, vol. 235, 107365.
12. Ashraf A., Sattar H., Munir S. A comparative performance evaluation of co-combustion of coal and biomass in drop tube furnace. *Journal of the Energy Institute*, 2022, vol. 100, pp. 55–65.
13. Feoktistov D.V., Glushkov D.O., Nurpeis A.E., Orlova E.G., Samoilo A.S., Zhizhaev A.M., Zhuikov A.V. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up. *Fuel Processing Technology*, 2022, vol. 236, 107422.
14. Guan J., Yu Q., Sun R., Shen T., Wang M., Yan Y., Song X. Experimental investigation for co-combustion characteristics of semi-coke and bituminous coal in a 3 MWth tangential combustion facility. *Journal of Thermal Science*, 2020, vol. 29, no. 6, pp. 1655–1662.
15. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeis A.E., Zhuikov A.V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Processing Technology*, 2021, vol. 223, 106986.
16. Yankovsky S.A., Kuznetsov G.V., Tolokolnikov A.A., Cherednik I.V., Ivanov A.A. Experimental study of the processes of reducing the formation of sulfur oxides during the co-combustion of particles of metalliferous coal and wood processing waste. *Fuel*, 2021, vol. 291, 120233.
17. Wang C., Wang C., Jia X., Gao X., Wang P., Feng Q., Che D. Experimental investigation on combustion characteristics and kinetics during Co-Firing bituminous coal with ultra-low volatile carbon-based solid fuels. *Journal of the Energy Institute*, 2021, vol. 95, pp. 87–100.
18. Hillig D.M., Pohlmann J.G., Manera C., Perondi D., Pereira F.M., Altafini C.R., Godinho M. Evaluation of the structural changes of a char produced by slow pyrolysis of biomass and of a high-ash coal during its combustion and their role in the reactivity and flue gas emissions. *Energy*, 2020, vol. 202, 117793.
19. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data. *Nature*, 1964, vol. 201, pp. 68–69.
20. Guo F., He Y., Hassanpour A., Gardy J., Zhong Z. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal. *Energy*, 2020, vol. 197, 117147.
21. Zhuikov A.V., Fetisova O.Y., Glushkov D.O. Thermal analysis of the combustion processes of brown coal, pine sawdust, cardboard, and their mixtures. *Solid Fuel Chemistry*, 2022, vol. 56, no. 4, pp. 285–292.
22. Boumanchar I., Chhiti Y., M'hamdi Alaoui F.E., Elkhroukhi M., Sahibed-dine A., Bentiss F., Jama C., Bensitel M. Investigation of (co)-combustion kinetics of biomass, coal and municipal solid wastes. *Waste Management*, 2019, vol. 97, pp. 10–18.
23. Gunasee S.D., Carrier M., Gorgens J.F., Mohee R. Pyrolysis and combustion of municipal solid wastes: Evaluation of synergistic effects using TGA-MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, vol. 121, pp. 50–61.
24. Vershinina K.Y., Dorokhov V.V., Medvedev V.V., Romanov D.S. Combustion of Coal Flotation Wastes and Woodworking Wastes in Blends and Suspensions. *Coke and Chemistry*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 202–209.
25. Nie Y., Deng M., Shan M., Yang X. Evaluating the impact of wood sawdust and peanut shell mixing ratio on co-combustion performance. *Fuel*, 2022, vol. 324, 124667.
26. Garcia E., Ejim I.F., Liu H. Thermogravimetric analysis of co-combustion of a bituminous coal and coffee industry by-products. *Thermochimica Acta*, 2022, vol. 715, 179296.
27. Zheng S., Hu Y., Wang Z., Cheng X. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 1373–1381.
28. Li W., Huang Y., Xie J., Lang L., Bu W., Jiang Y., Wang Y., Yin X. Assessment of Flammulina velutipes residue as potential fuels for co-combustion with pine sawdust from characteristics of combustion process, flue gases and ashes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, vol. 158, 105156.
29. Li X.G., Lv Y., Ma B.G., Jian S.W., Tan H.B. Thermogravimetric investigation on co-combustion characteristics of tobacco residue and high-ash anthracite coal. *Bioresource Technology*, 2011, vol. 102, no. 20, pp. 9783–9787.
30. Liu Z., Quek A., Kent Hoekman S., Srinivasan M.P., Balasubramanian R. Thermogravimetric investigation of hydrochar-lignite co-combustion. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 123, pp. 646–652.
31. Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sychev G.A. Thermogravimetric analysis of fuel mixtures from biomass and high-ash coal-containing wastes. *Thermophysics of High Temperatures*, 2020, vol. 5, no. 58, pp. 782–788. In Rus.
32. Deng L., Qiu Y., Jiang J., Zhu Z., Che D. Co-combustion characteristics of electrolytic aluminum waste and coal. *Fuel*, 2022, vol. 325, 124890.
33. Bogomolov A.R., Petrov I.Ya., Zhalmagambetova U.K. Thermal analysis of coals from Kazakhstan deposits. *Teploenergetika*, 2020, vol. 3, pp. 24–32.
34. Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sychev G.A. Thermogravimetric analysis of fuel blends of biomass and high-ash coal-containing waste. *High Temperature*, 2020, vol. 58 (5), pp. 710–715.

Received: 16 October 2022.

Reviewed: 21 November 2022.

#### Information about the authors

**Andrey V. Zhuykov**, Cand. Sc., head of the Educational and Scientific Laboratory, Siberian Federal University; researcher, Institute of Chemistry and Chemical Technology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

**Olga Yu. Fetisova**, Cand. Sc., researcher, Institute of Chemistry and Chemical Technology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

**Stanislav V. Chicherin**, postgraduate student, Thermo and Fluid Dynamics (FLOW), Vrije Universiteit Brussel (VUB); postgraduate student, Vrije Universiteit Brussel (VUB) and Université Libre de Bruxelles (ULB)

**Petr N. Kuznetsov**, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Chemistry and Chemical Technology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; professor, Siberian Federal University.

УДК 622.244.5

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ФИЛЬТРАТА БУРОВОЙ ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ В ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПЛАСТА С УЧЕТОМ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ СВОЙСТВ НЕФТИ

Никитин Василий Игоревич,  
nikitin@list.ru

Самарский государственный технический университет,  
Россия, 43100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

**Актуальность.** Постановка задачи математического моделирования двухфазной фильтрации в приближениях классического закона Дарси в недостаточной точности описывает процесс вскрытия продуктивного пласта, содержащего нефть, проявляющую вязкопластичные свойства. Учёт вязкопластичных свойств нефти с использованием нелинейного закона фильтрации позволит расширить границы применения методики расчета насыщенности и глубины проникновения фильтрата буровой промывочной жидкости в пласт для большего количества месторождений Российской Федерации. Практическая значимость использования математического моделирования процесса вскрытия продуктивного пласта заключается в возможности подбора жидкости вскрытия с целью сохранения фильтрационно-емкостных свойств породы коллектора и повышения дальнейшего дебита скважины. Расчет глубины проникновения в том числе позволяет оценить степень снижения проницаемости продуктивного пласта при первичном вскрытии.

**Цель:** разработка математической модели взаимодействия фильтрата буровой промывочной жидкости с вязкопластичной нефтью в поровом пространстве пласта и её применение к выбору жидкости вскрытия породы-коллектора.

**Методы.** Математическая постановка задачи проникновения фильтрата буровой промывочной жидкости в пласт с вязкопластичной нефтью описывается теорией двухфазной фильтрации. Для расчета используется модифицированная функция распределения потоков фаз Баклея–Левверетта, в которой для вытесняемой фазы применяется гиперболический закон фильтрации. Описываются методики измерения входных параметров математической модели и их модельные аналоги. Для выбора промывочной жидкости используется расчетный критерий. Расчет производится с использованием языка Wolfram Language, реализованного в пакете Wolfram Mathematica.

**Результаты.** Разработана математическая модель взаимодействия фильтрата буровой промывочной жидкости с вязкопластичной нефтью в поровом пространстве пласта. Расчетная методика численного эксперимента проведена для тестирования фильтратов пяти промывочных жидкостей при их взаимодействии с вязкопластичной нефтью месторождений Самарской области, Татарстана и Башкортостана. Путём применения расчетного критерия к выбору промывочной жидкости обоснован выбор наиболее качественной рецептуры для вскрытия коллекторов с представленными свойствами пластового флюида.

### Ключевые слова:

Вскрытие пластов, математическое моделирование, фильтрация, вязкопластичная нефть, буровой раствор, буровая промывочная жидкость.

### Введение

В процессе бурения скважины в призабойной зоне продуктивного пласта происходят гидродинамические процессы взаимодействия технологических жидкостей и природных флюидов. В зависимости от типов взаимодействующих жидкостей, а также свойств и параметров горной породы прогнозируются дальнейшие фильтрационные характеристики призабойной зоны. На основании состояния прискважинной зоны коллектора рассчитывается дебит с учётом скин-фактора. Исследование влияния технологических жидкостей имеет особую важность при развитии горизонтального бурения в связи с увеличением площади контакта продуктивного пласта с буровой промывочной жидкостью и другими технологическими системами [1]. Среди способов оценки изменения фильтрационно-емкостных свойств пород наиболее распространены методы физического моделирования с использованием образцов натурального керна [2] или керамических дисков [3, 4] и методы математического моделирования, в том числе с использованием метода конечного элемента [5]. Гидродинамические процессы фильтрации подлежат мате-

матическому моделированию. Технологические жидкости и пластовые флюиды имеют реологическую классификацию ньютоновских и неньютоновских сред. Законы фильтрации, применяемые для описания взаимодействия бурового раствора и нефти, должны максимально соответствовать их реальным свойствам, что позволит повысить точность расчетных методов. Наиболее распространённый линейный закон фильтрации Дарси, применяемый при моделировании как однофазной, так и двухфазной фильтрации, имеет ряд ограничений, связанных с типом жидкостей и параметров самого движения [6]. При движении, не подпадающем описанию законом Дарси, принято использовать нелинейные законы фильтрации, учитывающие особенности реологических параметров среды и динамических характеристик движения. Использование методов моделирования нелинейной фильтрации позволит наиболее адекватно описать процесс взаимодействия промывочной жидкости и пластового флюида в поровом пространстве пласта [7]. Результаты могут быть использованы в процессе совершенствования технологии вскрытия продуктивных пластов с точки зрения выбора жидкости вскрытия и оценки её влияния на призабойную зону.

### Методика математического моделирования

Анализируя реологические характеристики фильтрата буровой промывочной жидкости, можно сделать вывод о достаточно хорошем соответствии ньютоновской реологической модели среды. Низковязкие нефти или керосин, который часто выступает в качестве модели углеводородной среды при проведении фильтрационных экспериментов на образцах кернового материала, также хорошо описываются законом фильтрации Дарси и являются ньютоновскими средами. Математическая постановка задачи использует принципы построения моделей двухфазной фильтрации в проницаемых породах, на основании которых можно рассчитать насыщенность и глубину проникновения фильтрата в пласт [8, 9]. В классической постановке задачи принято строить функцию распределения потоков фаз, именуемую функцией Баклея–Левератта, как отношение скорости фильтрации вытесняющей фазы к суммарной скорости фильтрации:

$$f_f = \frac{1}{\frac{k_{ro}\mu_f}{1+k_{rf}\mu_o}} \quad (1)$$

где  $k_{ro}$  и  $k_{rf}$  – относительные фазовые проницаемости для нефти и фильтрата, соответственно;  $\mu_o, \mu_f$  – динамические вязкости нефти и фильтрата.

Используя построенную для ньютоновских сред функцию Баклея–Левератта (1) и её производную  $f'_f$ , рассчитывают фронтальную  $S_{front}$  и среднюю насыщенность  $\bar{S}$  фильтратом по формулам:

$$df'_f(S_{front}) = \frac{f_f(S_{front}) - f_f(S_0)}{S_{front} - S_0}, \quad (2)$$

$$\bar{S} = S_0 + \frac{1}{df'_f(S_{front})}, \quad (3)$$

где  $S_0$  – насыщенность связанной пластовой воды.

Важным параметром, характеризующим загрязнение призабойной зоны пласта, является радиус проникновения фильтрата  $r_f$ , рассчитываемый по показателю средней насыщенности:

$$r_f = \sqrt{r_{well}^2 + \frac{q_f A t}{\pi m h S}} - r_{well}, \quad (4)$$

где  $r_{well}$  – радиус скважины, от которого отсчитывается глубина проникновения,  $q_f$ ;  $A$  – площадь фильтрации;  $t$  – время фильтрации;  $m$  – пористость породы;  $h$  – длина интервала.

Важность вычисления данных параметров заключается в их дальнейшем использовании при вычислении скин-фактора призабойной зоны пласта и «кси»-критерия для выбора промывочной жидкости:

$$\xi = \bar{S}_f r_f / r_w. \quad (5)$$

Критерием для выбора оптимальной промывочной жидкости является условие минимума показателя  $\xi$  для обеспечения наибольшего сохранения фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны. Показателем надёжности данного критерия является его связь с коэффициентом восстановления проницаемости пласта, определяемым путём проведения фильтрационного эксперимента [10, 11].

Достаточно большое количество исследований посвящено изучению неньютоновских свойств нефти [12–14] и особенностей её движения [15, 16]. В работе [17] помимо географического распределения нефти на месторождениях России производится ещё анализ вязкости нефти в зависимости от возраста залежи, глубины залегания и стратиграфического подразделения. Согласно данным исследованиям на месторождениях России нередко встречается нефть с неньютоновскими свойствами, описываемыми реологической моделью вязкопластичной среды:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}, \quad (6)$$

где  $\tau_0$  – начальное напряжение сдвига (статическое или динамическое напряжение сдвига);  $\eta$  – пластическая вязкость;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига.

У нефти данного вида отмечают процессы структурообразования в связи с наличием высокомолекулярных компонентов в её составе, а именно:

- жидких веществ (метановые, нафтеновые, ароматические углеводороды);
- газообразных составляющих (углеводородные газы: метан, этан, пропан, бутан, н- и изопропантан, азот и др.);
- твердых веществ (высокомолекулярные парафины, асфальтены и смолы) [18].

Важно отметить, что существуют терминологические особенности подходов к описанию реологических параметров среды. Имеются различия в математической постановке задач о движении сред различной реологической классификации в кольцевых и щелевых каналах [19, 20] и в прикладных задачах фильтрации [21, 22]. В результате серий экспериментов по фильтрации вязкопластичной нефти через образцы кернового материала анализируют эмпирические зависимости скорости фильтрации  $q_o$  от градиента скорости  $\nabla P$  [23]. Установлено, что достаточно качественно аппроксимировать зависимость  $q_o(\nabla P)$  позволяет гиперболический закон фильтрации:

$$q_o = \frac{k \cdot k_{ro}}{\eta_{eff}} \frac{\nabla P}{H + \sqrt{H^2 + (\nabla P)^2}} \nabla P, \quad (7)$$

где  $k$  – абсолютная проницаемость пласта;  $\eta_{eff}$  – эффективная вязкость нефти с разрушенной структурой;  $\nabla P$  – градиент давления;  $H$  – градиент динамического давления сдвига [24].

Тогда функция Баклея–Левератта, являющаяся отношением скорости фильтрации вытесняющей фазы к суммарной скорости фильтрации двух фаз, использует линейный закон фильтрации Дарси для фильтрата бурового раствора и гиперболический (7) для вязкопластичной нефти, принимает вид:

$$f(S_f) = \frac{k_{rf}}{k_{rf} + \frac{\mu_f k_{ro}}{\eta_{eff}} \frac{\nabla P}{(H + \sqrt{H^2 + (\nabla P)^2})}}. \quad (8)$$

Используя данный вид функции распределения потоков фаз, можно рассчитать фронтальную и среднюю насыщенность фильтратом призабойной зоны пласта и радиус его распространения по формулам (2)–(4) с учётом (8). При этом «кси»-критерий (5), использующий параметры проникновения фильтрата в

пласт с вязкопластичной нефтью (6), также будет являться расчетным показателем, подходящим для тестирования жидкостей вскрытия пласта.

**Описание входных параметров математической модели**

Анализируя математическую модель двухфазной фильтрации с использованием гиперболического закона, можно выделить входные параметры физической постановки задачи и описать способы их получения для реализации расчетного алгоритма. Входные параметры реализуемой модели представлены в табл. 1. Среди них параметры жидкостей, пласта, технологические параметры задачи, фильтрационные характеристики и время фильтрационного процесса. При постановке задачи о сравнении качества жидкостей вскрытия пласта, достаточно получить относительные параметры, косвенно показывающие, какая жидкость является наиболее предпочтительной. Некоторые параметры могут принимать модельные или условные значения, относительно которых производится расчет.

В качестве тестируемых жидкостей были взяты базовые промывочные жидкости кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Самарского Государственного технического университета. Их типы: № 1 – глинистый; № 2 – полимер-глинистый; № 3 – хлоркалиевый; № 4 – смолосодержащий; № 5 – полимерный. В качестве моделей относительных фазовых проницаемостей для всех растворов использовались функции Чень-Чжун-Сян, для которых параметры  $S_0$  и  $S_{max}$  являются известными:

$$k_{rf} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq S_f \leq 0.2 \\ \left[ \frac{(S_f - 0.2)}{0.8} \right]^{3.5}, & \text{при } 0.2 \leq S_f \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$k_{ro} = \begin{cases} \left[ \frac{(0.85 - S_f)}{0.85} \right]^{2.8} (1 + 2.4S_f), & \text{при } 0 \leq S_f \leq 0.85 \\ 0, & \text{при } 0.85 \leq S_f \leq 1. \end{cases} \quad (10)$$

Параметры промывочных жидкостей и их фильтратов представлены в табл. 2, где отражены только параметры, необходимые для произведения расчетов. Скорость фильтрации определялась из показателя фильтрации на основании теста на фильтр-прессе Fann LPLT Series 300 и рассчитывалась как отношение среднего расхода фильтрата за 30 минут к площади фильтровальной поверхности.

Параметры вязкопластичной нефти взяты из источников: № 1 – нефть Самарской области [24], № 2 – нефть башкирского яруса Татарстана [25], № 3 – нефть Игровского месторождения Башкортостана. Параметры нефти, участвующие в расчетах, приведены в табл. 3. В отличие от ньютоновской нефти в таблице указана не динамическая вязкость, а эффективная вязкость при разрушении структуры. Также такой параметр, как  $H$  – градиент динамического давления сдвига (ГДДС), в классической постановке задачи не учитывается, но при использовании гиперболического закона при описании фильтрации вязкопластичной нефти является необходимым.

**Таблица 1.** Входные параметры математической модели

**Table 1.** Input parameters of the mathematical model

Обозначение Symbol	Наименование, единица измерения Description, unit of measure	Пояснение Explanation
$\mu_f$	Динамическая вязкость фильтрата, Па · с Dynamic viscosity of the filtrate, Pa · s	Определяется экспериментально Determined experimentally
$\eta_{eff}$	Вязкость нефти при разрушении структуры, Па · с Viscosity of oil at structure destruction, Pa · s	
$H$	Градиент динамического давления сдвига, $\frac{\text{Па}}{\text{м}}$ Dynamic shear pressure gradient, $\frac{\text{Pa}}{\text{m}}$	Определяется экспериментально или расчетным путём Determined experimentally or by calculation
	Относительная фазовая проницаемость для фильтрата Relative permeability for filtrate	Эмпирические или модельные функции, зависящие от насыщенности фильтратом Empirical or model functions depending on filtrate saturation
$k_{ro}$	Относительная фазовая проницаемость для нефти Relative phase permeability for oil	
$S_0$	Начальная насыщенность водной фазой, д. е. Initial saturation with water phase, u. f.	Экспериментальные или модельные параметры Experimental or model parameters
$S_{max}$	Предельная насыщенность фильтратом, д. е. Maximum saturation with filtrate, u. f.	
$r_{well}$	Радиус скважины, м Well radius, m	Значение радиуса скважины Borehole radius value
$A$	Площадь фильтрации, м <sup>2</sup> Filtration area, m <sup>2</sup>	Скважинная площадь фильтрации Well filtration area
$q_f$	Скорость фильтрации, м/с Filtration speed, m/s	Является характеристикой жидкости вскрытия пласта It is a characteristic of the drilling fluid
$t$	Время фильтрации, с Filtration time, s	Параметр технологического процесса Parameter of technological process
$m$	Пористость породы, д. е. Rock porosity, u. f.	Определяется экспериментально Determined experimentally
$h$	Длина интервала, м Interval length, m	Длина участка скважины Well section length

Для тестирования математической модели производился расчет взаимодействия каждого типа промывочной жидкости с каждой нефтью. При этом постоянные условия и рабочий градиент приняты постоянными величинами и представлены в табл. 4. По результатам тестирования можно будет определить изменение глубины проникновения фильтрата и насыщенности в зависимости от выбранного типа жидкости с учетом вязкопластичных свойств каждой нефти.

**Таблица 2.** Свойства промывочных жидкостей и их фильтратов

**Table 2.** Properties of drilling fluid and their filtrates

Наименование промывочной жидкости Drilling fluid name	Глинистая Clay	Полимер-глинистая Polymer-clay	Хлоркалевая Chloropotassium	Смолосодержащая Resin-containing	Полимерная Polymer
Параметр Parameter					
$\mu_f$ , Па·с/Pa·s	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$13,6 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
$V_{30}$ , показатель фильтрации, см <sup>3</sup> /30 мин Filtration rate, cm <sup>3</sup> /30 min	12	7,5	8	6	6
$q_f$ , см/мин cm/min	0,0088	0,0055	0,0058	0,0044	0,0044

**Обсуждение результатов расчетов**

На языке Wolfram Language программного комплекса Wolfram Mathematica по описанной методике двухфазной фильтрации был написан код для расчёта фильтрационных характеристик процесса вскрытия продуктивного пласта с использованием буровых промывочных жидкостей на водной основе. Для каждого фильтрата жидкости вскрытия пласта был произведен расчет взаимодействия с каждым из типов представленной вязкопластичной нефти. Результаты расчетов средней насыщенности и радиуса проникновения представлены графически на диаграммах рис. 1, 2. Так

как на восстановление проницаемости влияет как насыщенность, так и радиус проникновения, используется «кси»-критерий, в котором учитываются оба этих показателя (5). Наличие эмпирических функций относительных фазовых проницаемостей может повысить точность расчетов, но в связи со сложностью их определения допустимо использование характерных известных функций взаимодействия водной и углеводородной фазы в поровом пространстве, например, функций вида (9), (10).

**Таблица 3.** Реологические свойства нефти

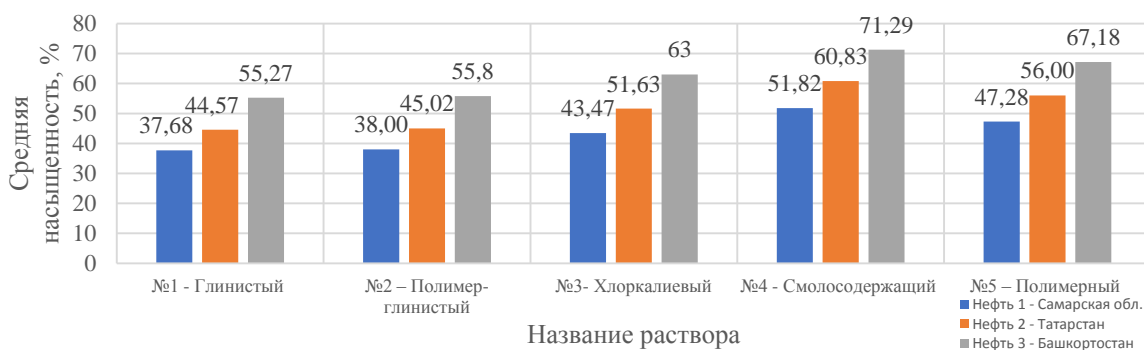
**Table 3.** Oil rheological properties

№ образца Sample no.	Название Name	Вязкость, Па·с Viscosity, Pa·s	H, Па·м Pa·m
1	Самарская область Samara region	0,7321	2800,8
2	Татарстан/Tatarstan	0,183	5800
3	Башкортостан Bashkortostan	0,0319	1060

**Таблица 4.** Общие входные параметры

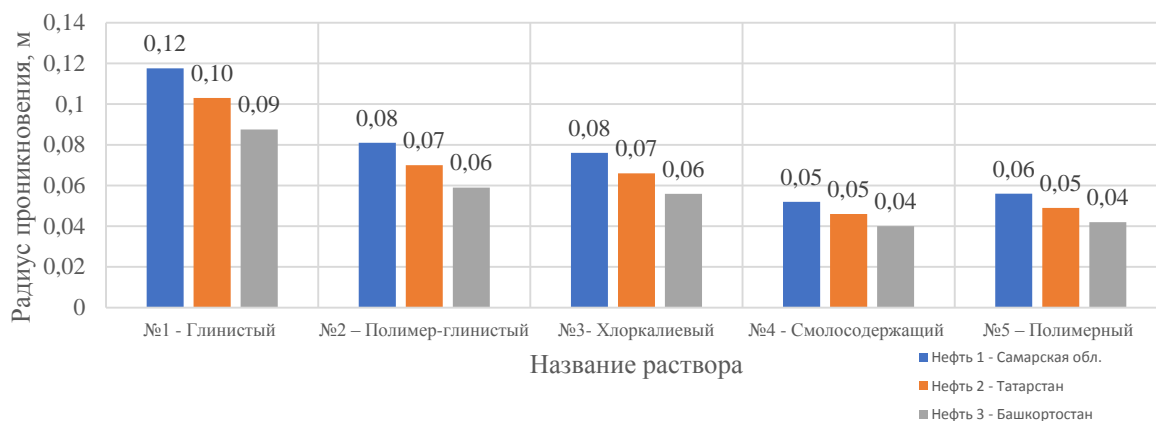
**Table 4.** Common input parameters

Длина рассматриваемого интервала, м Length of the considered interval, m	$h=1$
Пористость породы, д. е./Rock porosity, u. f.	$m=0,08$
Время фильтрации, ч/Filtration time, h	$t=1$
Радиус скважины, м/Well radius, m	$r_{well}=0,12$
Рабочий градиент давлений, МПа/м Operating pressure gradient, MPa/m	$\nabla P = 1$



**Рис. 1.** Средняя насыщенность фильтратом

**Fig. 1.** Average filtrate saturation



**Рис. 2.** Глубина распространения средней насыщенности

**Fig. 2.** Depth of medium saturation

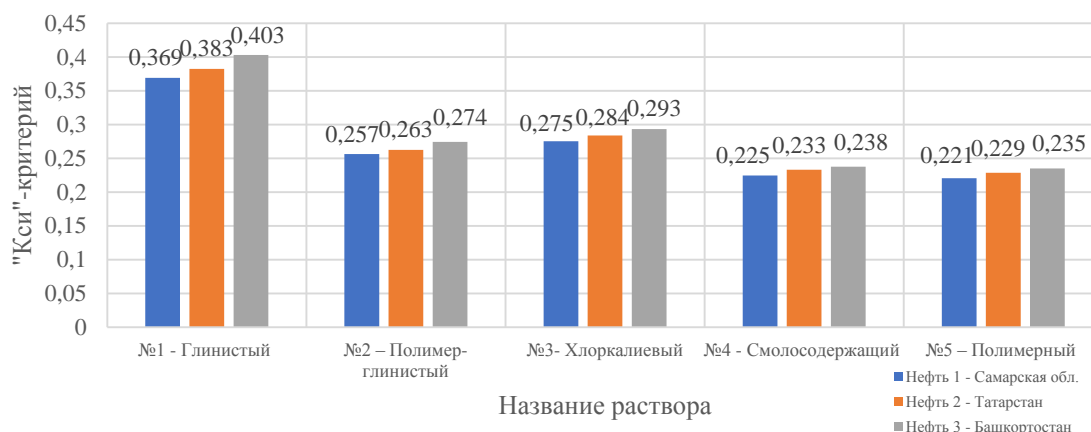


Рис. 3. Значения «кси»-критерия

Fig. 3. Values of «xi»-criterion

Анализируя результаты, представленные на рис. 3, на основании «кси»-критерия можно сделать вывод, что его наименьшие значения для тестируемых типов нефти соответствуют полимерной жидкости. Следовательно, раствор № 5 – наиболее предпочтителен для вскрытия пластов с рассматриваемыми видами нефти. Анализ диаграмм насыщенности и глубины проникновения показывает, что для всех типов растворов параметры нефти № 1 из Самарской области способствуют глубокому проникновению фильтрата, но с минимальной насыщенностью. Для нефти № 3 из Башкортостана видна обратная ситуация, при которой насыщенность выше, но глубина проникновения ниже. Если сравнивать сами эти нефти, то видно, что образцы из Самарской области имеют большую вязкость и градиент динамического давления сдвига, чем у нефти из Башкортостана. Помимо выбора жидкости вскрытия данные выводы могут быть полезны при проектировании обработки призабойной зоны пласта с целью интенсификации добычи и очистки от фильтрата. Анализируя результаты, на основании «кси»-критерия можно сделать вывод, что его наименьшие значения для всех типов нефти соответствуют полимерной жидкости. Следовательно, буровая промывочная жидкость под № 5 – наиболее предпочтительна для вскрытия пластов с рассматриваемыми видами нефти. Опыт проведения фильтрационных экспериментов и теория фильтрации обосновывают также данный вывод тем, что промывочным жидкостям, обладающим высокой вязкостью фильтрата и низким межфазным натяжением, соответствуют высокие значения капиллярного числа и относительно низкие значения капиллярного давления в поровом пространстве пласта [26]. Вязкость фильтрата учитывается в представленной математической модели. Возможность модификации математической модели с учётом межфазного натяжения также может повысить точность расчетов, но требует решения дополнительных расчетных и экспериментальных задач.

### Заключение

В работе проведен анализ методов моделирования фильтрации при вскрытии продуктивных пластов. Классические работы по моделированию фильтрационных процессов при вскрытии продуктивного пласта ограничиваются только рассмотрением течения жидкостей, подлежащих описанию реологической модели ньютоновской среды. Данное допущение не позволяет применять существующие методики к месторождениям высоковязкой нефти, описываемой вязкопластичной реологической моделью. Использование нелинейных законов фильтрации является перспективной задачей при моделировании проникновения фильтрата буровой промывочной жидкости в пласт. Дополнительные исследования законов фильтрации вязкопластичных сред позволили изучить методы моделирования их движения в поровом пространстве. На основании гиперболического закона фильтрации предложена математическая модель проникновения фильтрата бурового раствора в пласт с вязкопластичной нефтью. Так как методика расчета использует специализированные математические операторы, для реализации модели выбран пакет символьных вычислений Wolfram Mathematica. С использованием «кси»-критерия и результатов расчетов определена промывочная жидкость, наиболее подходящая для вскрытия пластов с выбранными параметрами нефти. Определено, при каких параметрах нефти фильтрат имеет тенденцию к глубокому проникновению, а при каких – к максимальной насыщенности. Эти выводы также могут быть полезны при планировании обработки призабойной зоны после вскрытия продуктивного пласта. Представленная методика расчета может быть использована при разработке программного обеспечения для расчета фильтрационных характеристики пласта при бурении с использованием буровых промывочных жидкостей на водной основе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Experimental lab approach for water based drilling fluid using polyacrylamide friction reducers to drill extended horizontal wells / M. Metwallya, T. Nguyna, H. Wiggins, A. Saasen, M. Gipsond //

Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 212. – Article № 110132.

2. Исследование качества вскрытия продуктивных пластов месторождений Западной Сибири различными типами биополимерных буровых растворов / А.С. Захаров, К.М. Минаев,

- А.В. Пестерев, А.С. Боев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 23–31.
3. Ronny K., Saasen K.A. A method for assessing drilling fluid induced formation damage in permeable formations using ceramic discs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – V. 213. – Article № 110324.
  4. Maximizing well productivity by using filter cake breaker for synthetic-based mud drilling fluid (SBMDIF) system / S. Irawan, S. Khaleeda, M. Shakeel, M. Fathaddin // *Upstream Oil and Gas Technology*. – 2022. – V. 9. – Article № 100075.
  5. A transient two-phase flow model for production prediction of tight gas wells with fracturing fluid-induced formation damage / Y. Wu, L. Cheng, L. Ma, S. Huang, S. Fang, J. Killough, P. Jia, S. Wang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 199. – Article № 108351.
  6. Fanchi J.R. Principles of applied reservoir simulation. 2nd ed. – Houston, TX: Gulf Publ. Company, 2001. – 376 p.
  7. Non-Darcy flows in layered porous media (LPMs) with contrasting pore space structures / X. Zhang, Z. Dou, J. Wang, Z. Zhou, C. Zhuang // *Petroleum Science*. – 2022. – V. 19. – № 2. – P. 2004–2013.
  8. A new approach to estimate invasion radius of water-based drilling fluid filtrate to evaluate formation damage caused by overbalanced drilling / K. Ling, H. Zhang, Z. Shen, A. Ghalambor, G. Han, J. He, P. Pei // *SPE Drilling & Completion Publisher: Society of Petroleum Engineers*. – 2015. – V. 30. – № 01. – P. 27–37.
  9. Zhang H., Ling K., Han G. Modified analytical equations of recovery factor for radial flow systems // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2016. – V. 137. – P. 250–257.
  10. Живаева В.В., Нечаева О.А., Никитин В.И. Применение расчетного критерия для выбора жидкости вскрытия продуктивного пласта // *Нефть. Газ. Новации*. – 2018. – № 6. – С. 48–50.
  11. Никитин В.И. Повышение качества вскрытия продуктивных пластов путём применения расчётного критерия к выбору промысловочной жидкости: дис. ...канд. техн. наук. – СПб, 2018. – 117 с.
  12. An improved viscosity prediction model of extra heavy oil for high temperature and high pressure / F. Jin, T. Jiang, C. Yuan, M.A. Varfolomeev, F. Wan, Y. Zheng, X. Li // *Fuel*. – 2022. – V. 319. – Article № 123852.
  13. Зиновьев А.М., Ольховская В.А., Ильин И.В. Экспериментальные исследования реологически сложной нефти месторождений Самарской области (Россия) // *Нефтепромысловое дело*. – 2017. – № 2. – С. 31–38.
  14. Особенности реологических свойств высоковязкой структурированной нефти / И.Н. Евдокимов, Н.Ю. Елисеев, А.П. Лосев, А.А. Фесан // *Фазовые превращения в углеводородных флюидах: теория и эксперимент: Тезисы докладов Международной научной конференции*. – М., 2016. – С. 69.
  15. Учет неньютоновских свойств высоковязкой нефти в процессе гидродинамического моделирования / А.В. Никитин, И.В. Каллин, В.А. Ольховская, П.В. Рошин, И.И. Киреев // *Нефтепромысловое дело*. – 2020. – № 12. – С. 64–69.
  16. Ильясов И.Р., Грачев С.И. Геолого-физические особенности разработки слабоконсолидированных коллекторов вязкой нефти // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 153–165.
  17. Полищук Ю.М., Ященко И.Г. Высоковязкие нефти: анализ пространственных и временных изменений физико-химических свойств // *Электронный научный журнал нефтегазовое дело*. – 2005. – № 1. – С. 31–47. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/PolishukYu/PolishukYu\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/PolishukYu/PolishukYu_1.pdf) (дата обращения 27.06.2022).
  18. Heavy oil production / V.A. Olkhovskaya, P.V. Roschin, I.A. Struchkov, V.T. Litvin, A.M. Zinoviev, Ch.K. Dziwormu. – St. Petersburg: Publishing Press Association, 2021. – 264 p.
  19. Leonov E.G., Isaev V.I. Applied hydro-aeromechanics in oil and gas drilling. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2010. – 427 p.
  20. Bridges S., Robinson L. Practical handbook for drilling fluids processing // *Gulf Drilling Guides*. – Cambridge: Gulf Professional Publishing, 2020. – 594 p.
  21. Modelling of non-linear viscoplastic oil flow to a well and development system selection / V. Astafev, A. Markelova, V. Olkhovskaya, A. Zinoviev // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2017. – V. 7. – № 2. – P. 521–529.
  22. Application of data driven machine learning approach for modelling of non-linear filtration through granular porous media / A. Banerjee, S. Pasupuleti, K. Mondal, M. M. Nezhadd // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2021. – V. 179. – Article № 121650.
  23. Ольховская В.А. Подземная гидромеханика: Фильтрация неньютоновской нефти. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2011. – 224 с.
  24. Динамика неустойчивых процессов заводнения нефтяных пластов и фильтрация при наличии трещин в поровом объёме / В.И. Астафьев, В.А. Ольховская, А.М. Зиновьев, А.Е. Касаткин, Е.В. Андриянова, С.И. Губанов. – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. – 192 с.
  25. Исследования по определению градиентов давления сдвига и предельного разрушения структуры для высоковязкой нефти месторождений Татарстана / М.М. Ремеев, О.С. Сотников, А.В. Фомичев, К.М. Мусин // *Сборник научных трудов ТАТНИПИНЕФТЬ*. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 97–100.
  26. Influence of capillary pressure on the restoration of the bottomhole zone permeability at the filtrate-oil interfacial phase / V.I. Nikitin, V.V. Zhivaeva, O.A. Nechaeva, E.A. Kamaeva // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. – 2019. – V. 2. – P. 558–562.

Поступила: 30.06.2022 г.

Прошла рецензирование: 06.11.2022 г.

#### Информация об авторах

**Никитин В.И.**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Самарского государственного технического университета.

UDC 622.244.5

## MATHEMATICAL MODELING OF DRILLING FLUID FILTER PENETRATION INTO THE BOTTOM-HOLE OF FORMATION TAKING INTO ACCOUNT OIL VISCOPLASTIC PROPERTIES

Vasily I. Nikitin,  
nikitin@list.ru

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

**The relevance.** The formulation of the problem of mathematical modeling of two-phase filtration in the approximations of the classical Darcy's law describes with insufficient accuracy the process of opening a productive formation containing oil exhibiting viscoplastic properties. Taking into account oil viscoplastic properties using a nonlinear filtration law will expand the scope of application of the methodology for calculating the saturation and depth of penetration of the drilling fluid filtrate into the formation for a larger amount of the fields in the Russian Federation. The practical significance of using mathematical modeling of the drilling-in process of a productive formation lies in the possibility of selecting the drilling fluid in order to preserve the porosity-reservoir properties of the reservoir rock and increase the further well production rate. The calculation of the penetration depth, among other things, makes it possible to assess the degree of decrease in the permeability of the reservoir during the initial opening.

**The main aim:** development of a mathematical model of the drilling fluid filtrate interaction with viscoplastic oil in the pore space of the reservoir and its application to the selection of the drilling fluid of the reservoir rock.

**Methods.** The mathematical formulation of the problem of drilling fluid filtrate penetration into a reservoir with viscoplastic oil is described by the theory of two-phase filtration. For the calculation, the modified Buckley–Leverett phase flow distribution function is used, in which the hyperbolic filtration law is applied to the displaced phase. Methods for measuring the input parameters of a mathematical model and their model analogs are described. A calculation criterion is used to select the drilling fluid. The calculation is performed using the Wolfram Language implemented in the Wolfram Mathematica package.

**Results.** A mathematical model was developed for drilling fluid filtrate interaction with viscoplastic oil in the pore space of the formation. The computational technique of the numerical experiment was carried out to test the filtrates of five drilling fluids during their interaction with viscoplastic oil from the fields of the Samara region, Tatarstan and Bashkortostan. By applying the calculation criterion to the choice of drilling fluid, the choice of the most high-quality formulation for opening reservoirs with the presented reservoir fluid properties is substantiated.

### Key words:

Reservoir penetration, mathematical modeling, filtration, viscoplastic oil, drilling fluid, drilling mud.

### REFERENCES

- Metwallya M., Nguyena T., Wiggins H., Saasen A., Gipsond M. Experimental lab approach for water based drilling fluid using polyacrylamide friction reducers to drill extended horizontal wells *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 212, Article no. 110132.
- Zakharov A.S., Minaev K.M., Pesterev A.V., Boev A.S. Influence of the composition of biopolymer drilling fluids on the quality of exposure of productive layers of the Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 23–31. In Rus.
- Ronny K., Saasen K.A. method for assessing drilling fluid induced formation damage in permeable formations using ceramic discs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 213, Article no. 110324.
- Irawan S., Khaleeda S., Shakeel M., Fathaddin M. Maximizing well productivity by using filter cake breaker for synthetic-based mud drilling fluid (SBMDIF) system. *Upstream Oil and Gas Technology*, 2022, vol. 9, Article no. 100075.
- Wu Y., Cheng L., Ma L., Huang S., Fang S., Killough J., Jia P., Wang S. A transient two-phase flow model for production prediction of tight gas wells with fracturing fluid-induced formation damage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 199, Article no. 108351.
- Fanchi J.R. *Principles of Applied Reservoir Simulation*. 2<sup>nd</sup> ed. Houston, TX, Gulf Publ. Company, 2001. 376 p.
- Zhang X., Dou Z., Wang J., Zhou Z., Zhuang C. Non-Darcy flows in layered porous media (LPMs) with contrasting pore space structures. *Petroleum Science*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 2004–2013.
- Ling K., Zhang H., Shen Z., Ghalambor A., Han G., He J., Pei P. A new approach to estimate invasion radius of water-based drilling fluid filtrate to evaluate formation damage caused by overbalanced drilling. *SPE Drilling & Completion Publisher: Society of Petroleum Engineers*, 2015, vol. 30, no. 01, pp. 27–37.
- Zhang H., Ling K., Han G. Modified analytical equations of recovery factor for radial flow systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 137, pp. 250–257.
- Zhivaeva V.V., Nechaeva O.A., Nikitin V.I. Application of calculated criteria to select reservoir penetrating fluid. *Oil. Gas. Novation*, 2018, vol. 6, pp. 48–50. In Rus.
- Nikitin V.I. *Povyshenie kachestva vskrytiya produktivnykh plastov putem primeneniya raschetnogo kriteriya k vyboru promyvochnoy zhidkosti*. Dis. kand. nauk [Improving the quality of the opening of productive layers by applying the calculation criterion to the choice of drilling fluid. Cand. Diss.]. St-Petersburg, 2018. 117 p.
- Jin F., Jiang T., Yuan C., Varfolomeev M.A., Wan F., Zheng Y., Li X. An improved viscosity prediction model of extra heavy oil for high temperature and high pressure. *Fuel*, 2022, vol. 319, Article no. 123852.
- Zinoviev A.M., Olkhovskaya V.A., Iliin I.V. Eksperimentalnye issledovaniya reologicheski slozhnoy nefi mestorozhdeniy Samarskoy oblasti (Rossiya) [Experimental studies of rheologically complex oil from the fields of the Samara region (Russia)]. *Neftepromyslovoe delo*, 2017, no. 2, pp. 31–38. In Rus.
- Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu., Losev A.P., Fesan A.A. Osobennosti reologicheskikh svoystv vysokovyazkoy strukturirovannoy nefi [Features of the rheological properties of high-viscosity structured oil]. *Fazovye prevrashcheniya v uglevodorodnykh flyuidakh: teoriya i eksperiment. Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Phase Transformations in Hydrocarbon Fluids: Theory and Experiment. Abstracts of the International Scientific Conference]. Moscow, 2016. pp. 69.
- Nikitin A.V., Kallin I.V., Olkhovskaya V.A., Roshchin P.V., Kireev I.I. Accounting of heavy oil non newtonian properties in the process of hydrodynamic simulation. *Oilfield engineering*, 2020, vol. 12, pp. 64–69.
- Ilyasov I. R., Grachev S. I. Geological and physical characteristics of the field development of unconsolidated viscous oil reservoirs.



- Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 153–165. In Rus.
17. Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Vysokovyzkie nefiti: analiz prostranstvennykh i vremennykh izmeneniy fiziko-khimicheskikh svoystv [High-viscosity oils: analysis of spatial and temporal changes in physical and chemical properties]. *Elektronny nauchny zhurnal neftegazovoe delo*, 2005, no. 1, pp. 31–47. Available at: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/PolishchukYu/PolishchukYu\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/PolishchukYu/PolishchukYu_1.pdf) (accessed 27 June 2022).
  18. Olkhovskaya V.A., Roschin P.V., Struchkov I.A., Litvin V.T., Zinoviev A.M., Dziwormu Ch.K. *Heavy oil production*. St. Petersburg, Publishing Press Association, 2021. 264 p.
  19. Leonov E.G., Isaev V.I. *Applied Hydro-Aeromechanics in Oil and Gas Drilling*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2010. 427 p.
  20. Bridges S., Robinson L. Practical handbook for drilling fluids processing. *Gulf Drilling Guides*. Cambridge, Gulf Professional Publishing, 2020. 594 p.
  21. Astafev V., Markelova A., Olkhovskaya V., Zinoviev A. Modelling of non-linear viscoplastic oil flow to a well and development system selection. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 521–529.
  22. Banerjee A., Pasupuleti S., Mondal K., Nezhadd M. M. Application of data driven machine learning approach for modelling of non-linear filtration through granular porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 179, Article no. 121650.
  23. Olkhovskaya V.A. *Podzemnaya gidromekhanika: filtratsiya ne-nyutonovskoy nefiti* [Subsurface fluid mechanics: non-Newtonian oil filtration]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2011. 224 p.
  24. Astafev V.I., Olkhovskaya V.A., Zinoviev A.M., Kasatkin A.E., Andriyanova E.V., Gubanov S.I. *Dinamika neustoychivyykh protsessov zavodneniya nefityanykh plastov i filtratsiya pri nalichii treshchin v porovom obeme* [Dynamics of unstable processes of oil reservoir flooding and filtration in the presence of cracks in the pore volume]. Samara, SNC Publ., 2019. 192 p.
  25. Remeev M.M., Sotnikov O.S., Fomichev A.V., Musin K.M. Issledovaniya po opredeleniyu gradientov davleniya sdviga i predelnogo razrusheniya struktury dlya vysokovyzkoy nefiti mes-torozhdeniy Tatarstana [Research on determination of shear pressure gradients and ultimate destruction of the structure for high-viscosity oil of Tatarstan fields]. *Collection of scientific papers TATNIPINEFT*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 97–100.
  26. Nikitin V.I., Zhivaeva V.V., Nechaeva O.A., Kamaeva E.A. Influence of capillary pressure on the restoration of the bottomhole zone permeability at the filtrate-oil interfacial phase. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*, 2019, vol. 2, pp. 558–562.

*Received: 30 June 2022.  
Reviewed: 6 November 2022.*

#### Information about the authors

**Vasily I. Nikitin**, Cand Sc., associate professor, Samara State Technical University.

УДК 621.314

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКТИВНЫХ СИЛОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

Дыбко Максим Александрович,  
Raptor9000@yandex.ru

Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, к. 4.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности систем электроснабжения для северных регионов, где расположена большая часть добывающей промышленности страны. Электроснабжение в этих районах обеспечивается, как правило, дизельными, газопоршневыми и гидроэлектрическими установками. Из-за отсутствия централизованного электроснабжения, дороговизны доставки топлива стоимость электроэнергии на порядок выше, чем в средней полосе России. Обилие нелинейных нагрузок и потребителей реактивной мощности приводит не только к ухудшению качества электрической энергии, но и к потерям из-за реактивной мощности и мощности искажения. Для минимизации негативного влияния нелинейных и реактивных потребителей в систему электроснабжения включают активный силовой фильтр, который представляет собой инвертор напряжения в режиме управляемого источника тока. Установка активного силового фильтра в систему электроснабжения требует серьезных капитальных вложений, поэтому необходима предварительная оценка экономического эффекта от его эксплуатации. Это, в свою очередь, требует проведения комплексной оценки его энергетической эффективности. Отсутствие на сегодняшний день единого методологического подхода к оценке эффективности работы активных силовых фильтров, отсутствие методики оценки КПД подобных устройств, а также необходимость оценки экономического эффекта от компенсации высших гармоник и реактивной мощности актуализирует задачу разработки математического аппарата оценки энергетической эффективности работы активных силовых фильтров.

**Цель:** повышение эффективности использования электрической энергии в системах электроснабжения северных регионов за счет применения систем накопления и активных силовых фильтров.

**Объекты:** устройства, предназначенные для обмена электромагнитной энергией с сетью – активные силовые фильтры и компенсаторы; нагрузки – нелинейные и реактивные.

**Методы.** Для достижения поставленной цели требуется разработка математического аппарата для адекватной оценки энергетической эффективности работы активных силовых фильтров. Для решения этой задачи выполнено математическое моделирование с использованием спектрального метода анализа и переключающих функций; составлена дискретная математическая модель трехфазного тиристорного управляемого мостового выпрямителя; составлена дискретная математическая модель активных силовых фильтров, включающая в себя расчет всех участков силовой схемы преобразователя, а также математическое описание алгоритма управления силовыми ключами; математическое описание активных силовых фильтров содержит расчет токовой загрузки силовых полупроводниковых приборов, расчет статических и динамических потерь. Предложен подход к расчету КПД активных силовых фильтров, где за полезную мощность принимается активная мощность, отдаваемая в нагрузку, а за полную мощность – сумма активной полезной мощности и потерь в активных силовых фильтрах. Предложен ряд других критериев для оценки энергетической эффективности активных силовых фильтров по реактивной мощности, полной мощности и мощности искажения.

**Результаты.** Получены результаты расчета электромагнитных процессов в силовой цепи активных силовых фильтров, интегральных параметров токовой загрузки силовых ключей инвертора активных силовых фильтров, статических и динамических потерь в активных силовых фильтрах, показателей энергетической эффективности активных силовых фильтров при работе на нелинейную и реактивную нагрузку. Расчеты получены для двух топологий инверторов активных силовых фильтров – двухуровневого и трехуровневого. Результаты расчетов в математической модели проверены имитационным моделированием в Matlab Simulink.

### Ключевые слова:

Электроснабжение северных регионов, компенсация реактивной мощности, компенсация мощности искажения, математическое моделирование работы активного силового фильтра, расчет коэффициента полезного действия активного силового фильтра.

### Введение

Северные территории и приравненные к ним в Российской Федерации занимают более 50 % от общей площади страны, 20 % территории находится за полярным кругом с населением около 2,5 млн человек [1]. Это отдельные районы Республик Саха (Якутия) и Карелии, Мурманской, Архангельской, Магаданской, Амурской и Сахалинской областей, Камчатского края, Чукотского АО, Ханты-Мансийского АО, Ямало-Ненецкого АО. Северные территории играют ключевую роль в национальной экономике, в обеспечении безопасности и геополитических интересов

России. Здесь сосредоточены основные запасы углеводородного, фосфорного и алюминий содержащего сырья, алмазов, редких, цветных и благородных металлов, добывается 93 % природного газа, 75 % нефти, включая газовый конденсат, 100 % алмазов, кобальта, платиноидов, апатитового концентрата, 90 % меди, никеля, 2/3 золота, производится половина лесной и рыбной продукции [2]. Системы энергоснабжения данных территорий имеют низкую энергетическую эффективность, средний износ генерирующего оборудования превышает 60 %, редко обновляются, что в конечном итоге приводит к низкой надежности. Не-

редки случаи блэкаута длительностью в 12–15 часов. Другой важной проблемой данных территорий является высокая стоимость электроснабжения. В отдельных районах стоимость 1 кВт·ч электрической энергии составляет 70 р. Большая часть расходов ложится на потребителя, а часть расходов компенсируется из федерального бюджета. [3]. На покрытие энергообеспечивающим предприятиям данных территорий ежегодно выделяется 60–65 млрд р. субсидий из бюджета [3]. К основным видам привозного топлива в такие районы относятся мазут, дизельное топливо и уголь. Существуют соответствующие логистические трудности и повышенные издержки на поставки данных видов топлива «Северным заводом». Для этих регионов тонна дизельного топлива обходится в 70–90 тыс. р./т, в то время как его стоимость для центральных регионов составляет порядка 50–55 тыс. р./т [4, 5].

Электроснабжение удаленных районов и населенных пунктов с низким количеством жителей за счет постройки линий электропередач, как правило, экономически нецелесообразно. Производство электрической энергии в таких районах осуществляется дизельными генераторными (ДГУ), газопоршневыми (ГПУ) и гидроэнергетическими установками (ГЭУ). Эффективность работы ДГУ и ГПУ определяется как отношение реализованной электрической энергии (проданной потребителю) к условной единице затраченного на ее выработку топлива, зависит от динамики изменения нагрузки, суточных графиков электрических нагрузок (динамика суточного потребления) и режимов работы самих установок. График суточного энергопотребления в отдаленных регионах крайне неравномерный, что негативно сказывается на эффективности расхода топлива. В дополнение к этому большая часть электрических нагрузок является источниками кондуктивных помех (высших гармоник тока) и потребителями реактивной мощности. В сетях малой генерации, а сети северных регионов на базе ДГУ, ГПУ и ГЭУ являются таковыми, высшие гармоники тока и потребление реактивной мощности оказывают негативное влияние на качество электрической энергии [6–11]. Наличие высших гармоник приводит к росту потерь в линиях электропередач, дополнительному нагреву электрооборудования, ускоренному старению изоляции и другим негативным эффектам [6, 8]. Потребление некомпенсированной реактивной мощности является причиной увеличения действующего значения тока сети, что в конечном счете ведет к росту полной потребляемой мощности без увеличения полезной, а также квадратичному росту мощности потерь [11]. Следствием вышперечисленного является неэффективное использование электрической энергии, а в случае питания от ДГУ или ГПУ еще и повышенному расходу топлива. Проблема обилия нелинейных и реактивных нагрузок становится актуальной не только в сетях малой генерации северных регионов страны, но и в сетях промышленных предприятий в других регионах. В этой связи задача повышения эффективности использования электрической энергии и ее качества ставится на государственном уровне, что нашло отражение в ряде документов,

утвержденных Правительством Российской Федерации: «Перечень критических технологий Российской Федерации от 7 июля 2011 года» [12], «Энергетическая стратегия России до 2035 г.» [13] и «Государственная программа РФ "Энергоэффективность и развитие энергетики"» [14].

В настоящее время повышение эффективности использования электрической энергии и ее качества в централизованных и малых сетях добиваются использованием, в частности, активных силовых фильтров (АСФ) и систем накопления энергии (СНЭ). АСФ позволяют компенсировать высшие гармоники нелинейной нагрузки, а также реактивную мощность. СНЭ позволяет накапливать электрическую энергию в часы низкого потребления и отдавать в часы пикового потребления, что обеспечивает более равномерное суточное энергопотребление. Для комплексной оценки энергетической эффективности при работе обоих устройств требуется расчет и анализ электромагнитных процессов в системе «источник электроэнергии – нагрузка – АСФ (СНЭ)». Анализ электромагнитных процессов необходим для комплексной оценки эффективности работы всего электротехнического комплекса. Целесообразность такой оценки проистекает из необходимости существенных вложений в приобретение, установку и обслуживание АСФ или СНЭ. Перед принятием решения о целесообразности установки подобного оборудования следует оценить, как скоро вложенные затраты окупят себя в виде снижения энергопотерь в системе и повышения эффективности и надежности работы электрооборудования. В настоящее время нет единого методологического подхода к оценке эффективности работы, например, АСФ или статических компенсаторов. Для этих и им подобных устройств отсутствует такое понятие, как коэффициент полезного действия, поскольку отсутствует в принципе понятие полезной мощности. Устройства компенсации в силу принципов своей работы осуществляют двухсторонний обмен электромагнитной энергией с источником первичного электропитания. В связи с этим задача качественного и количественного анализа электромагнитных процессов и энергетических характеристик является актуальной.

На сегодняшний день эффективность работы АСФ оценивают, в частности, с помощью коэффициентов гармоник тока и напряжения в сети до и после компенсации влияния нелинейной нагрузки [15]. В работе [16] предлагается свой критерий энергетической эффективности АСФ, отражающий относительную величину потерь в инверторе АСФ по отношению к компенсированным потерям мощности в сети. Такой критерий прямо показывает, насколько целесообразно в каждом конкретном случае использовать АСФ. Однако введенный критерий не учитывает потери мощности в фильтре ШИМ-гармоник АСФ, которые могут составлять до 60 % от всех потерь мощности в АСФ. Авторы [17] оценивают эффективность гибридных АСФ по нескольким показателям: полная мощность инвертора АСФ, коэффициент мощности нагрузки до и после компенсации, коэффициент гар-

мониторинг тока до и после компенсации для разных типов нагрузки. Сравнение по разным показателям делает оценку более объективной, однако большая часть сравниваемых показателей – абсолютные значения: мощности инвертора, напряжения звена постоянного тока, токи сети и инвертора, что затрудняет интерпретацию результатов для других диапазонов мощностей, топологий АСФ и т. п. В [18] авторы приводят сравнительный анализ мощности потерь для различных систем кондиционирования электрической энергии, которые состоят из двух типов АСФ – параллельного и последовательного. Анализ основан на расчете и сравнении мощностей потерь в абсолютных значениях. Из анализа литературы можно заключить, что для объективной оценки эффективности АСФ целесообразно введение относительных показателей и коэффициентов, имея которые можно сравнивать эффективность работы АСФ, статических компенсаторов и иных подобных устройств в различных случаях.

Для определения показателей энергетической эффективности АСФ необходимо выполнить анализ электромагнитных процессов на математической модели, который включает в себя расчет мгновенных значений токов и напряжений в силовой цепи АСФ, интегральных параметров токовой загрузки силовых полупроводниковых приборов, показателей качества электрической энергии, статических и динамических потерь мощности, потерь в фильтрах ШИМ-гармоник. Для этого в работе составлена математическая модель системы «первичный источник – нагрузка – АСФ». Модель основана на дискретном вычислении всех электрических переменных на одном периоде основной гармоники в установившемся режиме. Математический аппарат модели составляют переключающие (коммутационные) функции и спектральный метод [19–21].

Для вычисления КПД АСФ предложен принципиально новый подход, в соответствии с которым полезной мощностью будем считать активную мощность по основной гармонике, которая поступает в нагрузку (потери в самой нагрузке при этом не учитываются, т. к. нас интересует только потребляемая

от сети активная мощность); полная активная мощность при этом складывается из полезной мощности и потерь в АСФ, включающих в себя статические и динамические потери в силовых полупроводниковых приборах АСФ и потери активной мощности в фильтре ШИМ-гармоник АСФ. Стоит отметить, что в литературе в настоящее время имеется широкий спектр публикаций, посвященных различным способам определения статических и динамических потерь в силовых транзисторах инверторов напряжения [22–30]. Наибольшую сложность в инверторах напряжения представляет расчет динамических потерь. Многие методики ставят в основу синусоидальный характер протекающих в инверторе процессов, что позволяет получить более простое аналитическое выражение для расчета потерь [22, 23, 25, 27–29]. Однако особенность анализа электромагнитных процессов в инверторе АСФ в том, что все процессы носят несинусоидальный характер в режиме компенсации высших гармоник, т. к. инвертор работает в режиме источника несинусоидального тока. В связи с этим за основу для расчета динамических потерь была взята методика прямого вычисления энергии коммутации на каждом такте, описанная в заметке компании Semikron [30], и успешно опробована в ряде работ [24, 25, 28, 29].

В работе получены результаты анализа электромагнитных процессов в системе «первичный источник – нелинейная нагрузка – АСФ», интегральные параметры токовой загрузки силовых транзисторов инвертора АСФ для двух топологий инверторов, выполнены расчеты статических и динамических потерь в инверторе АСФ и фильтре ШИМ-гармоник. Результаты расчета на математической модели сопоставлены с результатами имитационного моделирования в Matlab Simulink.

#### Описание математической модели

Схема модели системы «Первичный источник – нелинейная нагрузка – АСФ» приведена на рис. 1, а. Эквивалентная расчетная схема приведена на рис. 1, б.

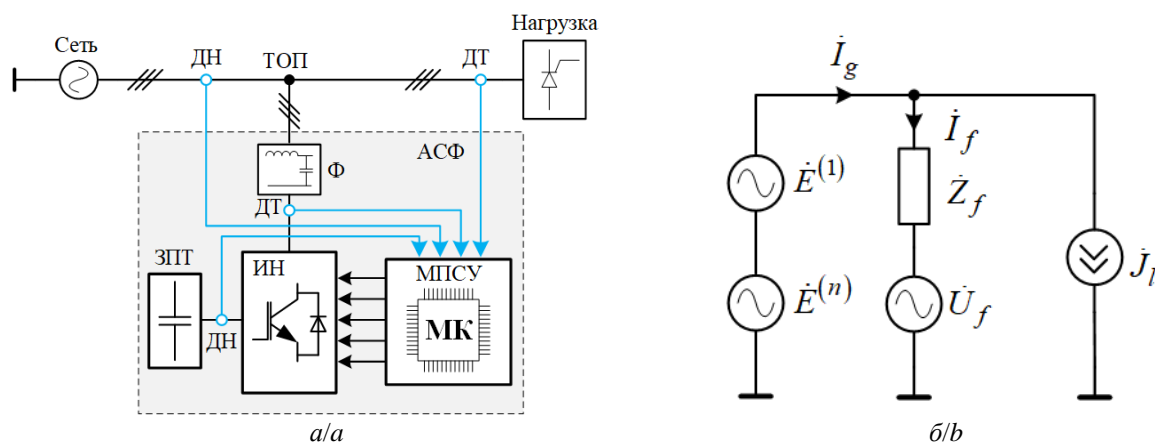


Рис. 1. Математическая модель системы «трехфазная сеть – нелинейная нагрузка – АСФ»: а) блок-схема модели; б) эквивалентная схема

Fig. 1. Mathematical model of the system «Three-phase AC grid – nonlinear load – Active power filter (APF)»: a) block diagram; b) equivalent circuit

Анализ электромагнитных процессов будем проводить с допущением, что трехфазная сеть является симметричной и ее мощность много больше мощности нагрузки.

Из эквивалентной схемы можно записать выражение для внутренней ЭДС АСФ:

$$\dot{U}_f = \dot{E} - (\dot{I}_g - \dot{J}_l) \dot{Z}_f, \quad (1)$$

где  $\dot{E} = \dot{E}^{(1)} + \dot{E}^{(n)}$  – ЭДС сети, которая в общем случае может представлять собой сумму основной  $\dot{E}^{(1)}$  и высших  $\dot{E}^{(n)}$  гармоник;  $\dot{I}_g$  – ток сети;  $\dot{J}_l$  – ток нагрузки;  $\dot{Z}_f$  – импеданс фильтра ШИМ-гармоник.

Описанная здесь математическая модель является дискретной, и все мгновенные значения электрических переменных за период основной гармоники получены в виде одномерных массивов размерностью  $N = 2^{14} = 16384$ , что соответствует шагу дискретного

моделирования  $\Delta = \frac{T^{(l)}}{N} = \frac{0,02}{16384} = 1,2 \text{ мкс}$ . Число

гармоник в спектрах электрических переменных равно  $N_n = 0,5N = 8192$ , что обеспечивает достаточную точность при воспроизведении периодических сигналов спектром гармоник.

Пусть ток нагрузки  $\dot{J}_l$  известен (задан рядом гармоник) и представляет собой ток управляемого мостового выпрямителя (рис. 2).

Напряжение трехфазной симметричной системы может включать в себя высшие гармоники и определяется следующим образом в комплексной форме:

$$\dot{E}_{abc} = E_1 e^{j\varphi_{e,1}} + \sum_{n>1} E_n e^{j\varphi_{e,n}}.$$

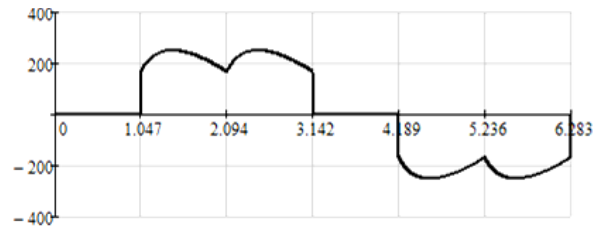


Рис. 2. Ток нелинейной нагрузки  
 Fig. 2. Nonlinear load input current

Алгоритм расчета электрических переменных в модели схематично представлен на, рис. 3. Переход от временной области к частотной осуществляется посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ):

$$\dot{\mathbf{F}} = \text{FFT}(f(t)), \quad (2)$$

где  $\dot{\mathbf{F}} = (\dot{F}^{(1)} \dot{F}^{(2)} \dots \dot{F}^{(n)})^T$  – вектор-столбец комплексных значений гармоник  $f(t)$ . Оператор **FFT** реализует быстрый алгоритм дискретного преобразования Фурье. Результат выполнения этого оператора – массив гармонических составляющих в комплексной форме. Переход от частотной области осуществляется с помощью обратного преобразования:

$$f(t) = \text{IFFT}(\dot{\mathbf{F}}). \quad (3)$$

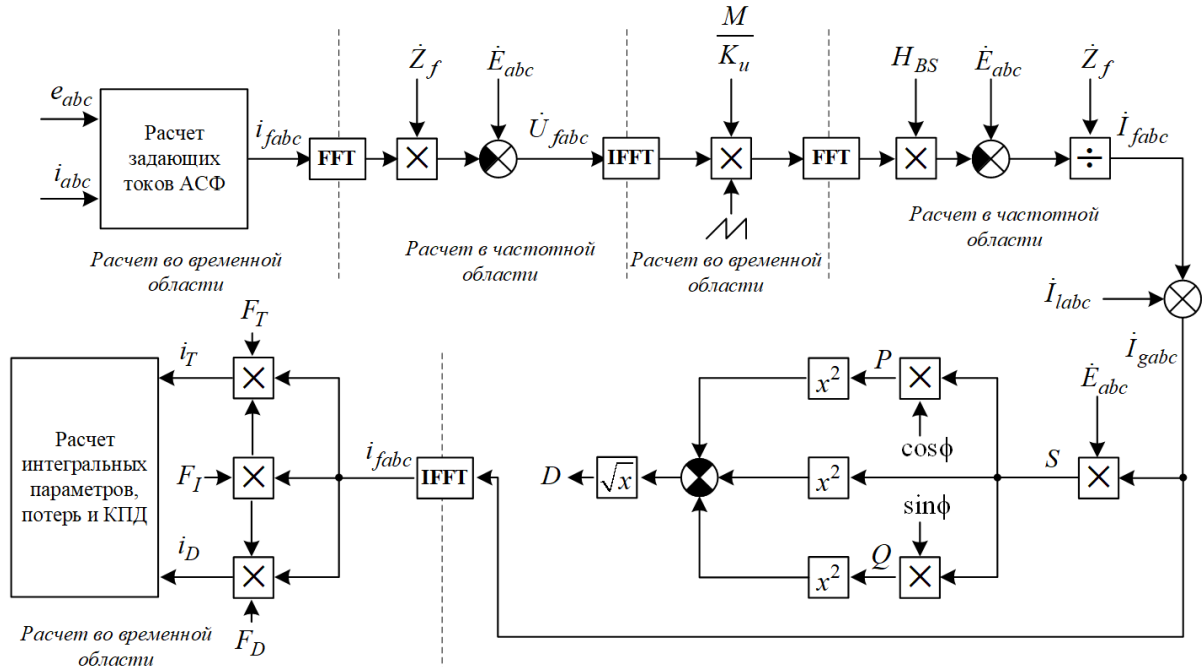


Рис. 3. Алгоритм расчета электромагнитных процессов в математической модели

Fig. 3. Electromagnetic processes calculation algorithm implemented in the mathematical model

Вычислим ток АСФ. В качестве математического аппарата используем теорию мгновенной мощности Х. Акаги [31]. Алгоритм формирования компенсирующего воздействия в виде тока, согласно этой теории, будет следующим:

1. Преобразование координат из  $\{a,b,c\}$  в  $\{\alpha,\beta\}$  (преобразование Кларк) для напряжения сети и тока нагрузки. В случае потребления постоянной активной мощности от сети участвуют все гармоники сетевого напряжения  $\{e_a, e_b, e_c\}$ , а в случае

формирования синусоидального тока при искаженной сети участвуют только гармоники, образующие прямую последовательность трехфазного сетевого напряжения:

$$\begin{pmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}.$$

2. Вычисляется мгновенные действительные и мнимые мощности:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}.$$

3. Из действительной мощности вычитается постоянная составляющая (поскольку модель дискретная, то интеграл заменен дискретной суммой):

$$\tilde{p} = p - \frac{1}{N} \sum_i p_i.$$

4. Вычисляются компенсирующие токи в координатах  $\{\alpha, \beta\}$

$$\begin{pmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{pmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{pmatrix}.$$

5. Выполняется обратное преобразование координат из  $\{\alpha, \beta\}$  в  $\{a, b, c\}$ :

$$\begin{pmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{pmatrix}.$$

В случае необходимости формирования единичного коэффициента мощности при искаженной сети, т. е. чтобы ток сети повторял форму напряжения сети, используется алгоритм минимизации токов Фризе в координатах  $\{a, b, c\}$  [32]:

1. Вычисляется мгновенное значение эквивалентной проводимости Фризе

$$g_e = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2}.$$

2. Из выражения (8) выделяется постоянная составляющая:

$$G_e = \frac{1}{N} \sum_i g_{e,i}.$$

3. Компенсирующие воздействия вычисляются из простого соотношения:

$$\begin{pmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{pmatrix} = G_e \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}.$$

Рассчитанные таким образом токи являются задающими в системе управления инвертором АСФ.

После этого в частотной области спектральным методом с помощью выражения (2) вычисляется гладкая составляющая выходного напряжения инвертора АСФ:

$$\dot{U}_{fabc}^{(n)} = \dot{E}_{abc}^{(n)} - \dot{I}_{fabc}^{(n)} \dot{Z}_f^{(n)}, \quad (4)$$

где  $\dot{Z}_f^{(n)}$  – комплексный импеданс фильтра ШИМ-гармоник в звене переменного тока АСФ. Выражение (4) определяет гармонический состав гладкой составляющей выходного напряжения инвертора АСФ. После перехода во временную область (выражение (3)) можно получить эту составляющую и преобразовать ее к уровню модулирующего сигнала ШИМ:

$$u_{ref,abc} = u_{fabc} \cdot \frac{M}{K_u},$$

где  $M = 2|\dot{U}_{f,a,b,c}^{(1)}|/U_{dc}$  – глубина модуляции;  $U_{dc}$  – напряжение звена постоянного тока;  $K_u = |\dot{U}_{f,a,b,c}^{(1)}|$  – коэффициент пропорциональности по напряжению, имитирующий цепи деления напряжения в системе управления инвертором АСФ.

Опорный сигнал ШИМ задается в зависимости от типа инвертора. Для классического двухуровневого трехфазного инвертора опорный сигнал может быть треугольной формы:

$$u_{car} = u_{2L} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left[ \sin \left( A \cdot \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right],$$

для трехуровневого инвертора два опорных сигнала могут быть заданы как:

$$u_{car} = u_{3L\pm} = \frac{1}{\pi} \arcsin \left[ \sin \left( A \cdot \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \pm \frac{1}{2},$$

где  $A = \frac{f_{PWM}}{f^{(1)}}$  – кратность частоты ШИМ ( $f_{PWM}$ ) к

частоте основной гармоники. Тогда потенциалы фаз инвертора относительно виртуальной нейтрали будут равны:  $\varphi_{a,b,c} = U_{dc} \cdot F_{sw}$  – для двухуровневого инвертора, и  $\varphi_{abc} = \frac{U_{dc}}{2} \cdot (F_{sw1} F_{sw2} + F_{sw2})$  – для трехуровневого инвертора, где

$$F_{sw} = \frac{1}{2} \left[ \text{sign}(u_{ref,a,b,c} - u_{2L}) + 1 \right] \quad (5)$$

переключающая функция силового модуля (включает в себя транзистор и диод)  $S_1 = \{T_1, D_1\}$  верхнего плеча двухуровневого инвертора напряжения (рис. 4, а);

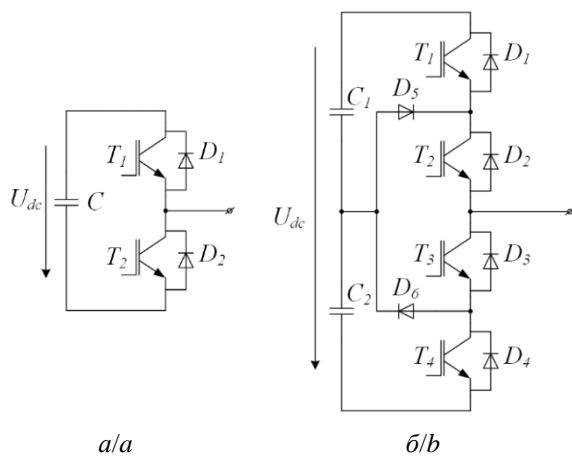
$$F_{sw1} = \frac{1}{2} \left[ \text{sign}(u_{ref,abc} - u_{3L+}) + 1 \right];$$

$$F_{sw2} = \frac{1}{2} \left[ \text{sign}(u_{ref,abc} - u_{3L-}) + 1 \right] \quad (6)$$

переключающие функции силовых ключей верхнего плеча  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 4, б).

**Таблица 1.** Расчет мощностей спектральным методом  
**Table 1.** Powers calculation using the spectral method

В нагрузке/Load side values:	В сети/Grid side values:
Полная мощность/Apparent power $S_l = \frac{3}{2} \sum_n  \dot{E}^{(n)}   i^{(n)} $	Полная мощность/Apparent power $S_g = \frac{3}{2} \sum_n  \dot{E}^{(n)}   i_g^{(n)} $
Активная мощность/Active power $P_l = \frac{3}{2} \sum_n  \dot{E}^{(n)}   i^{(n)}  \cos [\arg(i^{(n)}) - \arg(\dot{E}^{(n)})]$	Активная мощность/Active power $P_g = \frac{3}{2} \sum_n  \dot{E}^{(n)}   i_g^{(n)}  \cos [\arg(i_g^{(n)}) - \arg(\dot{E}^{(n)})]$
Реактивная мощность/Reactive power $Q_l = \frac{3}{2} \sum_n  \dot{E}^{(n)}   i^{(n)}  \sin [\arg(i^{(n)}) - \arg(\dot{E}^{(n)})]$	Реактивная мощность/Reactive power $Q_g = \frac{3}{2} \sum_n  \dot{E}^{(n)}   i_g^{(n)}  \sin [\arg(i_g^{(n)}) - \arg(\dot{E}^{(n)})]$
Мощность искажения/Distortion power $D_l = \sqrt{S_l^2 - P_l^2 - Q_l^2}$	Мощность искажения/Distortion power $D_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2 - Q_g^2}$



**Рис. 4.** Схемы двух- и трехуровневых инверторов (одна фазная стойка): а) двухуровневый инвертор; б) трехуровневый инвертор

**Fig. 4.** Two- and three-level inverter phase leg: a) two-level inverter; b) three-level inverter

Потенциал виртуальной нейтрали равен

$$\varphi_0 = \frac{1}{3}(\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c).$$

Выходные ступенчатые напряжения для фазы «а» инвертора:  $u_f = \varphi_a - \varphi_0$ . Далее в частотной области, по схеме замещения на рис. 1, б, соотношению (1) и алгоритму (рис. 3) выполняется расчет гармоник тока инвертора:

$$\dot{i}_f^{(n)} = \frac{\dot{E}_a^{(n)} - \dot{U}_f^{(n)}}{\dot{Z}_f^{(n)}}. \quad (7)$$

Рассчитаем мощности в сечении сети и сечении нагрузки (табл. 1).

#### Расчет токовой загрузки инвертора АСФ

Расчет токовой загрузки инвертора включает в себя расчет мгновенных значений токов силовых полупроводниковых приборов, а также интегральные параметры – действующие и средние значения. Расчет токовой загрузки позволяет вычислить статические и динамические потери в инверторе АСФ.

В ранее проведенных исследованиях было показано, что мгновенные значения токов в силовых ключах инвертора можно вычислить путем перемножения их переключающих функций на фазный ток, спектр которого получен в (7) [27].

Для двухуровневого инвертора переключающая функция верхнего модуля определена выражением (5). Чтобы выделить переключающие функции отдельно диода и транзистора, учтем, что транзистор проводит при отрицательном направлении тока (от звена постоянного тока к сети), а диод – при положительном. Для этого введем переключающую функцию направления фазного тока, которая будет принимать единичное значение при положительном токе и нулевое – при отрицательном:

$$F_l = \frac{1}{2} \text{sign}(i_f) + \frac{1}{2}. \quad (8)$$

Тогда с учетом (5) и (8) вычислим мгновенные значения токов для двухуровневого инвертора:

$$i_{T1} = F_{sw} \cdot (1 - F_l) \cdot i_f, \quad i_{T2} = (1 - F_{sw}) \cdot F_l \cdot i_f;$$

$$i_{D1} = F_{sw} \cdot F_l \cdot i_f, \quad i_{D2} = (1 - F_{sw}) \cdot (1 - F_l) \cdot i_f.$$

Аналогичным образом из (6) и (8) получаем значения токов силовых полупроводниковых приборов и для трехуровневого инвертора:

$$i_{T1} = F_{sw1} \cdot (1 - F_l) \cdot i_f; \quad i_{T2} = F_{sw2} \cdot (1 - F_l) \cdot i_f;$$

$$i_{T3} = (1 - F_{sw1}) \cdot F_l \cdot i_f; \quad i_{T4} = (1 - F_{sw2}) \cdot F_l \cdot i_f;$$

$$i_{D1} = F_{sw1} \cdot F_l \cdot i_f; \quad i_{D2} = F_{sw1} \cdot F_l \cdot i_f;$$

$$i_{D3} = (1 - F_{sw2}) \cdot (1 - F_l) \cdot i_f;$$

$$i_{D4} = (1 - F_{sw2}) \cdot (1 - F_l) \cdot i_f;$$

$$i_{D5} = F_{sw2} \cdot (1 - F_{sw1}) \cdot (1 - F_l) \cdot i_f;$$

$$i_{D6} = (1 - F_{sw1}) \cdot (1 - F_{sw2}) \cdot F_l \cdot i_f.$$

На рис. 5 показаны примеры результатов расчета мгновенных значений токов в виде осциллограмм, построенных в пакете Mathcad.

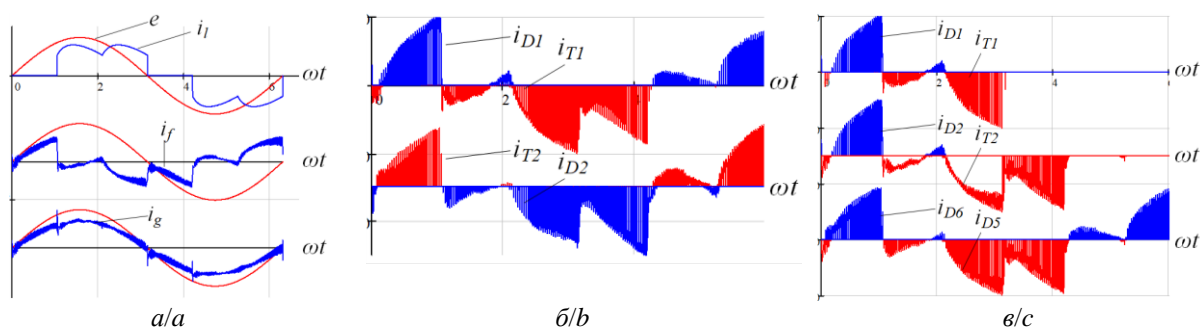


Рис. 5. Осциллограммы токов инвертора АСФ: а) работа АСФ при компенсации гармоник и реактивной мощности; б) токи силовых ключей АСФ на базе двухуровневого инвертора; в) токи силовых ключей АСФ на базе трехуровневого инвертора

Fig. 5. APF currents waveforms: a) APF operation when compensating harmonics and reactive power; b) power semiconductor currents for two-level inverter; c) power semiconductor currents for three-level inverter

Вычисление интегральных параметров токовой нагрузки силовых полупроводниковых приборов – средних и действующих значений – выполняется для каждого полупроводникового прибора по определению с учетом дискретности:

$$I_{avg} = \frac{1}{N} \sum_j i_T; \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j (i_T)^2},$$

где  $j \in [0; N-1]$  – индекс элемента массива. Поскольку в дискретной математической модели во временной области все электрические переменные представлены одномерными массивами размера  $N$ , все вычисления во временной области выполняются над массивами поэлементно. Предполагается, что все переменные во временной области имеют индекс  $j$ , который во всех формулах опущен, чтобы не загромождать выражения и не затруднять их чтение.

#### Расчет мощности потерь в АСФ

Статические потери в силовых полупроводниковых приборах вычисляются по известному соотношению:

$$P_{cond} = I_{rms}^2 r_{on} + I_{avg} \cdot U_{on},$$

где  $r_{on}$  – дифференциальное сопротивление полупроводникового прибора в открытом состоянии;  $U_{on}$  – напряжение на открытом полупроводниковом приборе.

Наибольшую сложность представляет собой расчет динамических потерь, поскольку требуется корректный расчет количества коммутаций и учет амплитуды коммутируемого тока в ключе, что является нетривиальной задачей при несинусоидальной модуляции.

Выполним расчет динамических потерь, пользуясь базовым соотношением [30]:

$$E_{sw} = E_{swref} \cdot \left( \frac{I_k}{I_{k,ref}} \right)^{Ki} \cdot \left( \frac{U_{кз}}{U_{кз,ref}} \right)^{Kv} \times \left( 1 + TC_{sw} (T_j - T_{jref}) \right), \quad (9)$$

где  $E_{swref} = E_{onref} + E_{offref}$  – значения энергии включения и выключения, приведенные в справочных данных

при тестовых условиях;  $I_{k,ref}$ ,  $U_{кз,ref}$  – значения тока коллектора и напряжения коллектор–эмиттер, при которых производителем измерены значения  $E_{onref}$  и  $E_{offref}$ ;  $I_k$ ,  $U_{кз}$  – фактические значения тока коллектора и напряжения коллектор–эмиттер при коммутации;  $T_{jref}$ ,  $T_j$  – тестовое и реальное значения температуры соответственно;  $Ki$  – степень зависимости энергии коммутации от тока коллектора (для IGBT  $Ki \approx 1$ , для обратного диода  $Ki \approx 0,5 \dots 0,6$ );  $Kv$  – степень зависимости энергии коммутации от обратного напряжения (для IGBT  $Kv \approx 1,2 \dots 1,4$ , для обратного диода  $Ki \approx 0,6$ );  $TC_{sw}$  – температурный коэффициент энергии коммутации (для IGBT  $TC_{sw} \approx 0,003$ , для обратного диода  $TC_{sw} \approx 0,005 \dots 0,006$ ).

Мощность потерь на переключения вычислим как суммарную энергию переключения для транзистора и антипараллельного диода:

$$P_{sw} = f^{(1)} \sum_{N_{sw}} E_{sw}.$$

На каждом такте ШИМ коммутируемый ток отличается, поэтому отличается и энергия. Однако, в силу линейной зависимости энергии от тока, можно упростить расчет. Так как среднее значение энергии ком-

мутации  $E_{sw,avg} = \frac{\sum E_{sw}}{N_{sw}}$ , очевидно, что суммарную

энергию можно найти умножением средней энергии на число коммутаций:  $\sum_{N_{sw}} E_{sw} = N_{sw} \cdot E_{sw,avg}$ . Значе-

ние средней энергии коммутации получим из среднего значения коммутируемого тока, которое найдем в математической модели преобразователя. Среднее значение коммутируемого тока транзистора вычисляется как среднее значение гладкой составляющей тока транзистора в пределах такого интервала, на котором имеют место процессы коммутации транзистора или диода. На рис. 5, б видно, что в двухуровневом инверторе транзистор и диод коммутируются по половине периода основной гармоники, следовательно, для двухуровневого инвертора среднее значение коммутируемого тока можно определить из простого уравнения для диода и транзистора:



$$I_{T_{sw,avg}} = \frac{1}{N \cdot \Delta_{T_{sw}}} \sum_j [i_f \cdot (1 - F_I)],$$

$$I_{D_{sw,avg}} = \frac{1}{N \cdot \Delta_{D_{sw}}} \sum_j [i_f \cdot F_I], \quad (10)$$

где  $\Delta_{T_{sw}}$  и  $\Delta_{D_{sw}}$  – относительные длительности интервалов, на которых имеются коммутации, которые в данном случае равны половине периода основной гармоники.

В трехуровневом инверторе интервалы коммутации более сложные (рис. 5, в). Их можно вычислить, используя переключающие функции фазного тока ( $F_I$ ) и напряжения ( $F_U$ ). Средние коммутируемые токи и относительные длительности интервалов коммутации для транзисторов верхнего плеча ( $T_1, T_2, D_1, D_2, D_5$ ) трехуровневого инвертора (рис. 4, б):

$$I_{T1sw,avg} = \frac{1}{\Delta_{T1sw,avg} \cdot N} \sum_j [i_f (1 - F_I) F_U],$$

$$\Delta_{T1sw,avg} = \frac{1}{N} \sum_j (1 - F_I) F_U;$$

$$I_{T2sw,avg} = \frac{1}{\Delta_{T2sw,avg} \cdot N} \sum_j [i_f (1 - F_I) (1 - F_U)],$$

$$\Delta_{T2sw,avg} = \frac{1}{N} \sum_j (1 - F_I) (1 - F_U);$$

$$I_{D1,2sw,avg} = \frac{1}{\Delta_{D1,2sw,avg} \cdot N} \sum_j [i_f F_I F_U],$$

$$\Delta_{D1,2sw,avg} = \frac{1}{N} \sum_j F_I F_U;$$

$$I_{D5sw,avg} = \frac{1}{\Delta_{D5sw,avg} \cdot N} \sum_j [i_f (1 - F_I)],$$

$$\Delta_{D5sw,avg} = \frac{1}{N} \sum_j F_I. \quad (11)$$

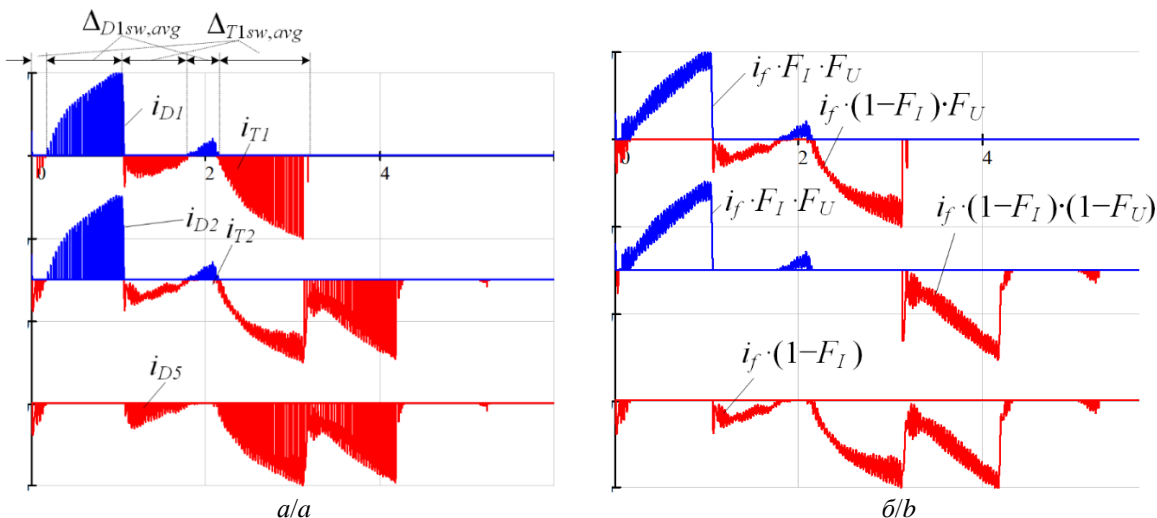


Рис. 6. Эпюры токов силовых транзисторов и диодов: а) мгновенные значения; б) огибающая для расчета среднего коммутируемого тока

Fig. 6. Waveforms of the power semiconductor currents: a) real currents; b) amplitude envelopes

На рис. 6, а представлены эпюры токов транзисторов и диодов верхнего плеча с обозначением интервалов коммутации и их составляющих, на рис. 6, б – огибающие амплитуд импульсов токов силовых ключей на интервалах коммутации.

Для расчета суммарной энергии коммутации за период основной гармоники необходимо знать количество коммутаций. Для трехуровневого инвертора нужно умножить количество тактов ШИМ на всем периоде (т. е. на кратность ШИМ) на относительную длительность интервала с коммутациями:

$$N_{T1sw} = \Delta_{T1sw,avg} \cdot A,$$

$$N_{T2sw} = \Delta_{T2sw,avg} \cdot A,$$

$$N_{D1,2sw} = \Delta_{D1,2sw,avg} \cdot A,$$

$$N_{D5sw} = \Delta_{D5sw,avg} \cdot A. \quad (12)$$

Подставляя (10)–(12) в (9) и используя справочные данные, вычислим среднюю энергию коммутации для каждого переходного процесса в транзисторах и диодах инверторов. Суммируя энергии включения, умножая на количество коммутаций за период и на частоту основной гармоники, получаем мощность коммутационных потерь для двухуровневого инвертора:

$$P_{sw,2L} = 6 \cdot f^{(1)} (E_{swT} \cdot N_{swT} + E_{swD} \cdot N_{swD}).$$

Для трехуровневого инвертора:

$$P_{sw3L} = 6 f^{(1)} \left( E_{swT1} N_{T1sw} + E_{swT2} N_{T2sw} + 2 E_{swD12} N_{D1,2sw} + E_{swD5} N_{D5sw} \right).$$

Помимо статических и динамических потерь существенный вклад вносят и активные потери в фильтре ШИМ-гармоник, которые можно приближенно оценить по выражениям:

- $P_f = 3 I_{f,rms}^2 \cdot r_f$  – для фильтров первого порядка ( $L$ -фильтр) (рис 7, а);
- $P_f = 3 (I_{g,rms}^2 \cdot R_g + I_{f,rms}^2 \cdot R_f + I_{c,rms}^2 \cdot R_c)$  – для фильтра третьего порядка ( $LCL$ -фильтр) (рис. 7, б).

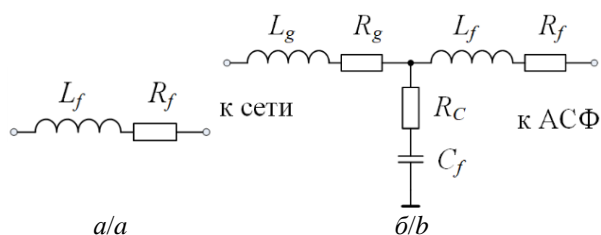


Рис. 7. Фильтры ШИМ-гармоник: а) фильтр первого порядка; б) фильтр третьего порядка

Fig. 7. PWM-harmonic filters: a) first order filter; b) third order filter

Тогда суммарные потери в АСФ будут складываться из трех составляющих:

$$P_{APF} = \sum P_{cond} + \sum P_{sw} + P_f.$$

#### КПД и энергетические характеристики АСФ

Расчет КПД есть отношение полезной мощности к полной. Для понимания этих составляющих необходимо адекватное определение полезной мощности с точки зрения АСФ. Работа последнего кардинально отличается от типовых систем электропитания, где идет односторонняя передача активной мощности в нагрузку. В АСФ и других подобных устройствах (статические компенсаторы, компенсаторы реактивной мощности и др.) осуществляется обмен электромагнитной энергией с сетью, т. е. как такового потребления активной мощности нет, за исключением потерь. В то же время АСФ не работает без нагрузки в сети. Поэтому автором предлагается за *полезную мощность принять активную мощность, потребляемую нагрузкой по основной гармонике*  $P_1^{(1)}$ . Высшие гармоники и реактивная мощность, потребляемые нагрузкой от сети, компенсируются АСФ. *Потери в АСФ в сумме с полезной мощностью предлагается принять за полную мощность.* Таким образом, предлагается следующее определение КПД для АСФ:

$$\eta_{APF} \equiv \frac{P_1^{(1)}}{P_1^{(1)} + P_{APF}}. \quad (13)$$

Помимо КПД предлагается оценивать эффективность компенсации реактивной мощности, мощности искажения:

1. *Коэффициент полной мощности*  $\eta_D$  как отношение полной мощности в сечении сети  $S_g$  к полной мощности в сечении нагрузки  $S_l$ . Этот показатель отражает, во сколько раз снижается полная мощность, потребляемая из сети, за счет компенсации ее *неактивных* составляющих (реактивная мощность и мощность искажения):

$$\eta_S \equiv \frac{S_g}{S_l}. \quad (14)$$

Максимальное значение показателя равно единице, когда компенсация отсутствует. Чем ниже значение, тем эффективнее работа АСФ.

2. *Коэффициент реактивной мощности*  $\eta_D$  – отношение реактивной мощности в сечении сети к реактивной мощности в сечении нагрузки:

$$\eta_Q \equiv \frac{Q_g}{Q_l}. \quad (15)$$

При наличии реактивной нагрузки и отсутствии компенсации  $\eta_D=1$ , что говорит об отсутствии компенсации реактивной мощности. При полной компенсации реактивной мощности  $\eta_D=0$ . При отсутствии потребления реактивной мощности нагрузкой  $\eta_D$  также приравнивается к нулю.

3. *Коэффициент мощности искажения*  $\eta_D$  – отношение мощности искажения в сечении сети к мощности искажения в сечении нагрузки:

$$\eta_D \equiv \frac{D_g}{D_l}. \quad (16)$$

При наличии нелинейной нагрузки и отсутствии компенсации  $\eta_D=1$ , что говорит об отсутствии компенсации мощности искажения. При полной компенсации мощности искажения  $\eta_D=0$ . При отсутствии потребления мощности искажения нагрузкой  $\eta_D$  также приравнивается к нулю.

Предложенные показатели энергетической эффективности призваны не заменить имеющиеся, а дополнить их. Таким образом, эффективность работы АСФ предлагается оценивать как традиционными показателями (коэффициент гармоник тока в сечении сети, коэффициент мощности в сети), так и введенными в выражениях (13)–(16). Отметим, что на данный момент введенные энергетические показатели справедливы для неискаженной формы сетевого напряжения. В случае искажения сетевого напряжения возникает сразу несколько различных ситуаций, которые требуют отдельного рассмотрения и будут исследованы в будущих публикациях. В рамках данной работы выполним математическое и имитационное моделирование работы АСФ и проведем комплексную оценку его энергетической эффективности в различных конфигурациях структуры АСФ.

#### Моделирование работы АСФ

Для проверки полученных результатов было выполнено имитационное моделирование работы АСФ на нелинейную нагрузку в пакете моделирования Matlab Simulink. Для моделирования был выбран наиболее сложный по конфигурации вариант АСФ – на базе трехуровневого инвертора напряжения с фильтром ШИМ-гармоник третьего порядка. Параметры модели приведены в табл. 2.

При моделировании были проведены следующие измерения:

- мгновенные значения токов в точке общего присоединения;
- мгновенные значения токов IGBT-модулей инвертора;
- интегральные параметры токовой загрузки IGBT-модулей инвертора;
- полная, активная, реактивная мощности и мощность искажения на стороне нагрузки и сети;
- КПД и коэффициенты мощностей по выражениям (13)–(16).

На рис. 8, *a* представлены осциллограммы мгновенных значений в точке общего присоединения: напряжение сети ( $e$ ), ток нагрузки ( $i_l$ ), ток АСФ ( $i_f$ ) и ток сети ( $i_g$ ) после компенсации высших гармоник и реактивной мощности, полученные в математической модели. На рис. 8, *б* – те же осциллограммы, измеренные в модели Matlab Simulink.

На рис. 9, *a* приведены осциллограммы токов силовых полупроводниковых приборов, построенные в математической модели; на рис. 9, *б* – те же осциллограммы, измеренные в Matlab.

В табл. 3 приведены интегральные параметры тиковой нагрузки силовых ключей верхнего плеча трехуровневого инвертора АСФ, рассчитанные в математической модели и измеренные в Matlab.

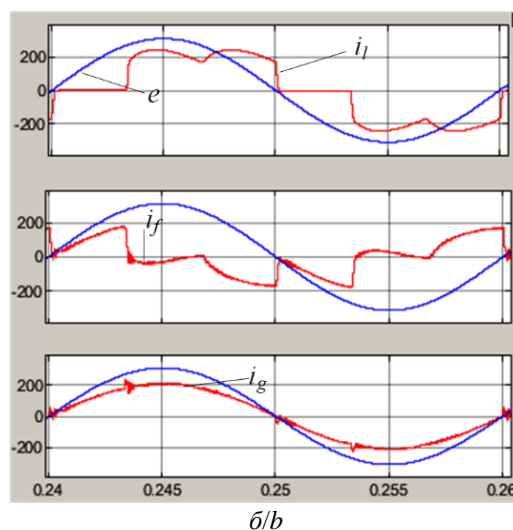
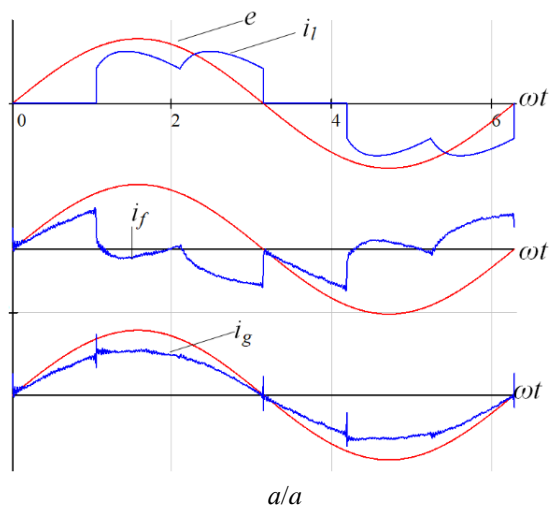
Из анализа табл. 3 видно, что значения интегральных параметров токовой нагрузки полупроводниковых приборов, рассчитанные в математической модели, в целом соответствуют измеренным в имитационной модели.

В табл. 4 приведены значения показателей энергетической эффективности.

**Таблица 2.** Параметры имитационной модели

**Table 2.** Simulation model parameters

Параметр/Parameter	Значение/Value
Шаг моделирования/Time step	$1 \cdot 10^{-7}$ с/s
Сеть/AC mains	
Конфигурация сети/Grid configuration	Трёхфазная симметричная/Three-phase symmetrical
Высшие гармоники в напряжении сети Higher harmonics in the grid voltage	Нет/No
Действующее фазное напряжение, В AC rms voltage	220 В/V
Нагрузка/Load	
Схема нагрузки/Load circuit	Трёхфазный мостовой тиристорный выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой Three-phase full bridge rectifier with <i>RL</i> -load
Входной импеданс (имитация трансформатора) Input impedance	$L_l=0,1$ мГн/мH, $R_l=1$ мОм/mOhm
Выходной импеданс нагрузки Load output impedance	$L_d=1$ мГн/мH, $R_d=2$ Ом/Ohm
Мощность нагрузки/Load power	$P_d=94,4$ кВт/kW
Угол управления/Firing angle	$\alpha=30^\circ$
АСФ/APF	
Инвертор/VSI type	Трёхфазный трехуровневый на базе IGBT/Three-phase three-level IGBT-based VSI
Конденсаторы звена постоянного тока DC-link capacitors	2 x 20000 мкф/ $\mu$ F
Фильтр ШИМ-гармоник/PWM-harmonic filter	рис. 7, б/fig. 7, b
Параметры фильтра/Filter parameters	$L_g=L_f=0,05$ мГн/мH, $C_f=10$ мкф/ $\mu$ F $R_g=R_f=R_c=0,01$ Ом/Ohm, $f_0=10066$ Гц/Hz
Частота ШИМ/PWM frequency	$f_{PWM}=20$ кГц/kHz
Напряжение звена постоянного тока DC-link voltage	$U_{dc}=800$ В/V
Параметры IGBT модуля/IGBT parameters [32]	$U_{T,on}=1$ В/V, $U_{D,on}=1$ В/V, $r_{on}=4$ мОм/mOhm



**Рис. 8.** Осциллограммы в точке общего присоединения  
**Fig. 8.** Waveforms in the point of common coupling

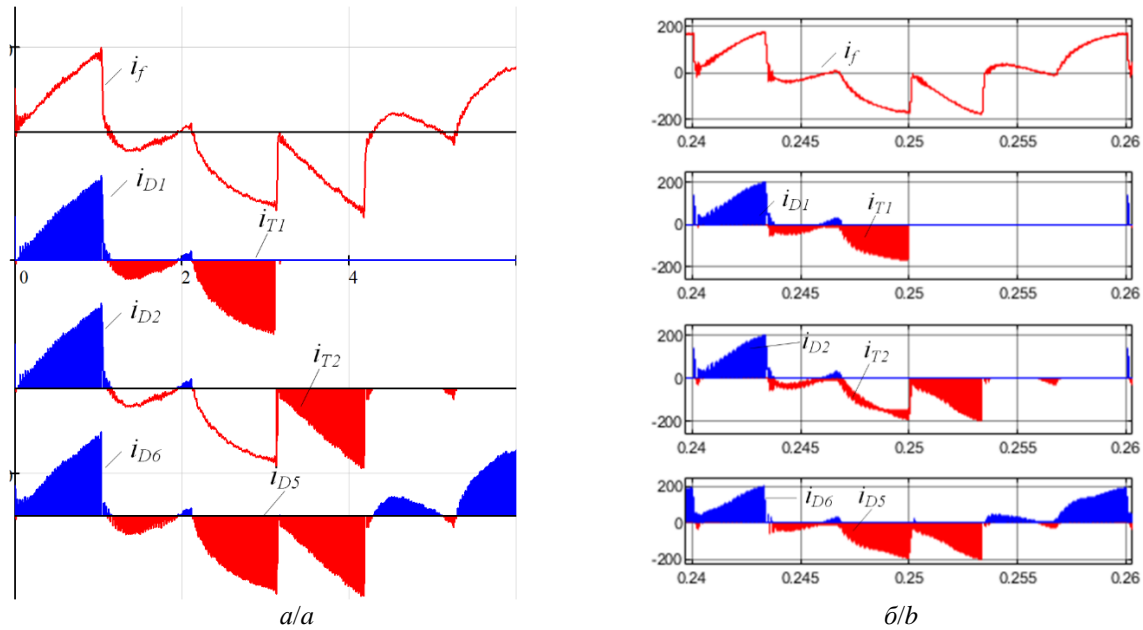


Рис. 9. Осциллограммы токов силовых ключей  
 Fig. 9. Power switches currents

Таблица 3. Расчет и измерение интегральных параметров токовой загрузки  
 Table 3. Calculated and measured average and root-mean-square values

Транзистор/диод Transistor/diode	Значение тока, А Current value, A	Расчет Calculated	Измерение в модели Simulated
$T_1$	Среднее/Average	8,36	8,70
	Действующее/rms	28,77	29,18
$D_1, D_2$	Среднее/Average	8,72	8,79
	Действующее/rms	35,25	34,93
$T_2$	Среднее/Average	31,82	32,45
	Действующее/rms	62,24	63,03
$D_5$	Среднее/Average	23,46	23,75
	Действующее/rms	55,19	55,83

Таблица 4. Показатели энергетической эффективности  
 Table 4. Energy and power quality factors

Показатель/Value	Расчет в математической модели Calculated in mathematic model	Измеренные в имитационной модели Measured in simulation model
Коэффициент гармоник тока нагрузке, %/Load THD, %	31,82	30,94
Коэффициент гармоник тока в сети, %/Grid current THD, %	0,01	4,97
Коэффициент сдвига (cosφ) в нагрузке/Load DPF	0,873	0,86
Коэффициент сдвига (cosφ) в сети/Grid DPF	1,0	1,0
Полная мощность нагрузки, кВА/Load apparent power, kVA	114,9	117,2
Полная мощность в сети, кВА/Grid apparent power, kVA	100,4	98,03
Активная мощность нагрузки, кВт/Load active power, kW	100,4	96,54
Активная мощность в сети, кВт/Grid active power, kW	100,4	97,9
Реактивная мощность в нагрузке, кВАр Load reactive power, kVAr	55,9	56,71
Реактивная мощность в сети, кВАр/Grid reactive power, kVAr	0	0
Мощность искажения в нагрузке, кВА Load distortion power, kVA	0,689	34,65
Мощность искажения в сети, кВА/Grid distortion power, kVA	0	4,87
Мощность потерь в фильтре ШИМ-гармоник АСФ, кВт PWM harmonic filter losses, kW	0,617	0,616
Статические потери в инверторе АСФ, кВт APF conduction losses, kW	0,966	0,748
Динамические потери в инверторе АСФ, кВт APF switching losses, kW	1,808	–
Суммарная мощность потерь в АСФ, кВт APF total power losses, kW	3,39	1,364
КПД АСФ, %/APF efficiency, %	96,96	98,61
Коэффициент полной мощности/Аpparent power factor	0,873	0,836
Коэффициент реактивной мощности/Reactive power factor	0	0
Коэффициент мощности искажения/Distortion power factor	0	0,14

Энергетические показатели, приведенные в табл. 4, в целом соответствуют измеренным на имитационной модели. Есть ряд нюансов, заслуживающий отдельного внимания:

- Активная мощность в нагрузке и в сети в математической модели совпадают, так как в математической модели при расчете токов было принято допущение об идеальности силовых ключей инвертора АСФ и отсутствии в нем активных потерь, в то время как в имитационной модели заданы статические параметры силовых ключей и потери в сети учитывают потери в АСФ (статические потери инвертора и потери в фильтре).
- Модель инвертора в пакете Matlab Simulink не учитывает динамику работы силовых полупроводниковых приборов, и, как следствие, в ней отсутствуют динамические потери, что существенно занижает значение суммарных потерь в инверторе.
- Следствием всего этого является существенная разница в значении мощности искажения, которая вычисляется как геометрическая разность полной мощности, активной и реактивной мощностей.
- Разница в расчетном и измеренном КПД обусловлена отсутствием учета динамических потерь в модели инвертора АСФ в пакете моделирования Matlab Simulink.

#### Заключение

Представленный математический аппарат, основанный на методе переключающих функций и спектральном методе, позволяет вычислять все электрические переменные для оценки энергетической эффективности активных силовых фильтров – мгновенные значения и интегральные параметры. Составленная на его основе математическая модель системы «сеть–АСФ–нагрузка» позволяет оценить энергетическую эффективность работы АСФ. Ключевым преимуществом данного способа расчета и анализа электромагнитных процессов является то, что вне зависимости

от схемотехники АСФ трудоемкость математических операций существенно не меняется. Имитационное моделирование в пакете Matlab Simulink показало качественное и количественное сходство результатов. В то же время моделирование в Matlab занимает порядка 10 минут на ПК средней производительности, в то время как на расчет математической модели в Mathcad уходит не более 1 минуты.

Предложенный способ расчета КПД адекватно оценивает работу АСФ, соотнося потери в нем с полезной мощностью, которой является активная мощность нагрузки.

Открытым на данный момент остается ряд вопросов, связанных с исследованием данного показателя для различных случаев нагрузки по ее величине, характеру (нелинейная, реактивная), алгоритму компенсации в условиях гармонических искажений формы напряжения сети. Аналогичный вывод касается и других введенных в работу коэффициентов: их знание позволяет судить о степени компенсации той или иной составляющей полной мощности в рамках теории мощности по С. Budeanu [33]. В то же время при искаженной форме напряжения сети возникают сразу несколько вопросов, связанных с адекватной оценкой этих мощностей. В этом случае целесообразно оценивать энергетические показатели, опираясь на, например, теорию мгновенной мощности Н. Akagi [31] или на теорию физических составляющих токов Л. Чарнецкого [34]. Эти вопросы будут детально исследованы в будущих публикациях.

В целом представленные энергетические показатели в дополнение к уже имеющимся образуют адекватный базис энергетических показателей, позволяющий дать достаточно полное представление об эффективности работы АСФ или подобного ему устройства в различных режимах. Введенные показатели энергетической эффективности могут быть распространены на компенсаторы реактивной мощности, последовательные компенсирующие и фильтро-компенсирующие устройства и т. п.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики / В.Х. Бердин, А.О. Кокорин, Г.М. Юлкин, М.А. Юлкин. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. – 80 с.
2. Постановление правительства Российской Федерации № 198 от 7 мая 2000 г. // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=201001273&rdk=&backlink=1> (дата обращения 21.10.2022).
3. Энергоснабжение изолированных территорий / В. Гимди, А. Курдин, Д. Нестер, А. Амирагян и др. // Энергетический бюллетень аналитического центра при правительстве Российской Федерации № 51. – август 2017. – 28 с.
4. Средние цены на бензин в городах России. URL: <https://fuelprices.ru/ceny-na-benzin-v-gorodah-rossii> (дата обращения 21.10.2022).
5. Цены месяца // Приложение к журналу «ТЭК России» № 12. – 2021. URL: [https://www.cdu.ru/upload/medialibrary/54c/f0soj1ffdr4tsebwhxjw8qz1kbigk5a/Prices\\_12\\_2021.pdf](https://www.cdu.ru/upload/medialibrary/54c/f0soj1ffdr4tsebwhxjw8qz1kbigk5a/Prices_12_2021.pdf) (дата обращения 21.10.2022).
6. Электромагнитная совместимость потребителей. Монография / И.В. Жежеленко, А.К. Шилдовский, Г.Г. Пивняк, Ю.Л. Саенко, Н.А. Нойберггер. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
7. Electrical power systems quality / R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty. – New York: McGraw-Hill Education, 2004. – 521 p.
8. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
9. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
10. Khan S., Singh B., Makhija P. A review on power quality problems and its improvement techniques // 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). – Vellore, 2017. – P. 1–7.
11. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
12. Перечень критических технологий Российской Федерации от 7 июля 2011 года // Сайт Администрации Президента России. URL: <http://kremlin.ru/supplement/988> (дата обращения 21.10.2022).
13. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года // Сайт аналитического центра при Правительстве Российской Федерации. URL: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf> (дата обращения 21.10.2022).

14. Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики» в редакции от 18.10.2019 № 321 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102424400&acklink=1&&nd=102349663> (дата обращения 21.10.2022).
15. Abramovich B.N., Sychev Y.A. The evaluation of hybrid active filter efficiency // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov, Russia, 2016. – P. 1–7.
16. Energy efficiency criterion of Power Active Filter in a three-phase network / O. Plakhtii, V. Nerubatskiy, Ya. Scherbak, A. Mashura, I. Khomenko // IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – Kharkiv, Ukraine, 2020. – P. 165–170.
17. Wang L., Lam C.-S., Wong M.-C. The analysis of DC-link voltage, compensation range, cost, reliability and power loss for shunt (hybrid) active power filters // 2018 IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – Sabah, Malaysia, 2018. – P. 640–645.
18. Yadav S.K., Patel A., Mathur H.D. Study on comparison of power losses between UPQC and UPQC-DG // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2022. – V. 58. – № 6. – P. 7384–7395.
19. Dybko M.A., Brovanov S.V. A New method of current calculation in power semiconductor devices of diode-clamped multilevel VSC // Proc. of 3rd International Youth Conference on Energetics, IYCE 2011. – Leiria, Portugal, July 7–9, 2011. – P. 1–7.
20. Брованов С.В., Дыбко М.А. Расчет динамических потерь в многоуровневых полупроводниковых преобразователях с емкостным делителем напряжения // Доклады академии наук высшей школы РФ. – 2011. – № 2 (17). – С. 46–55.
21. Методика расчета динамических потерь мощности в полупроводниковых преобразователях на транзисторах типа MOSFET с векторным способом управления / М.А. Дыбко, Е.В. Гришанов, С.В. Брованов, В.Г. Токарев // Доклады АН ВШ РФ. – 2017. – № 3 (36). – С. 52–63. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-3-52-63
22. Analysis of power losses in a three-phase inverter 3L-NPC. Comparison with different PWM modulation techniques / J.S. Artal-Sevil, J.M. Lujano-Rojas, C. Bernal-Ruiz, I.S. Gorrachategui // XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEЕ). – La Laguna, Spain, 2018. – P. 1–9.
23. Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive // 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). – Algiers, Algeria, 2016. – P. 768–773.
24. Hafezi H., Faranda R. A new approach for power losses evaluation of IGBT/diode module // MDPI Electronics. – 2021. – V. 10. – № 3:280. – P. 1–22.
25. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Energy loss analysis in a SiC/IGBT propulsion inverter over drive cycles considering blanking time, MOSFET's reverse conduction and the effect of thermal feedback // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Detroit, MI, USA, 2020. – P. 1505–1511.
26. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses / G. Feix, S. Dieckerhoff, J. Allmeling, J. Schonberger // 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). – Barcelona, Spain, 2009. – P. 1–8.
27. Babaie A., Karami B., Abrishamifar A. Improved equations of switching loss and conduction loss in SPWM multilevel inverters // 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC). – Tehran, Iran, 2016. – P. 559–564.
28. Losses and thermal calculation of IGBT and FWD in PWM inverter for electric engineering maintenance rolling stock / C. Xi, H. Shenghua, L. Bingzhang, X. Yangxiao // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Chiba, Japan, 2016. – P. 1–5.
29. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Power loss analysis in a SiC/IGBT propulsion inverter including blanking time, MOSFET's reverse conduction and the effect of thermal feedback using a PMSM model // IECON The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Singapore, 2020. – P. 1424–1430.
30. Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules // Application Note AN 1403, 19.08.2014 URL: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-note-determining-switching-losses-of-semikron-igbt-modules-en-2014-08-19-rev-00/> (дата обращения 27.10.2022).
31. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE press series on power engineering. – New Jersey: John Wiley&Sons. 2017. – 432 p.
32. Infineon FF300R12ME7\_B11 // IGBT module datasheet URL: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF300R12ME7\\_B11-DataSheet-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4627aa5d4f5017b10ad70463236](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF300R12ME7_B11-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4627aa5d4f5017b10ad70463236) (дата обращения 27.10.2022).
33. Budeanu C.I. The different options and conceptions regarding active power in nonsinusoidal systems. – Bucharest: Institut Romain de l'Energie, 1927.
34. Czarniecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of power theory // International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation. – Lagow, Poland, 2008. – P. 1–11.

Поступила: 05.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 17.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Дыбко М.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет.

UDC 621.314

## ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF ACTIVE POWER FILTERS FOR POWER SUPPLY SYSTEMS USED IN THE NORTHERN AREAS

Maksim A. Dybko,  
Raptor9000@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University,  
20, bld. 4, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630037, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need of energy efficiency improvement at the power supply systems used in the northern areas, where the best part of the mining industry is located. In these regions power supply is provided by diesel generator units, gas-turbine generator units and water power plants. Lack of the centralized electricity and expensive fuel transportation have made the cost of the electrical energy ten times higher than in central regions. Plenty of the nonlinear and reactive loads results in poor power quality, reactive and distortion power losses. In order to minimize the nonlinear and reactive loads influence, active power filters are implemented. Typically, an active power filter is a voltage source inverter operating as a controlled current source. An active power filter installation requires substantial investments and, therefore, economic considerations must be taken into account. This, in its turn requires a comprehensive energy efficiency estimation of the active power filter operation to be done. Currently, there is no any unified approach to estimate the energy efficiency of an active power filter or similar power electronic device as well as no method to estimate its efficiency and possible economic effect of non-active power compensation. All of these makes the development of a mathematical model of the power supply system with an active power filter to be an actual problem.

**The main aim** is energy efficiency improvement in power supply systems of the northern areas by active power filter implementation.

**Objects:** power electron devices intended to electrical energy circulation between them and the grid, such as active power filters, STATCOMs, etc.

**Methods.** In order to achieve the aim of the research, several tasks were formulated. One of them is the mathematical approach to estimate the active power filter energy efficiency. This approach uses calculation based on spectral method and switching functions. The mathematical model is represented in a discrete form. It allows one to calculate all the currents and voltages in the power circuit of the active power filters, its rms and average values. A new approach to calculate the efficiency is proposed. It suggests to set the load active power as the useful power and the one plus the active power filters power losses as the total power. Besides, three new power quality factors are proposed to give an estimation of active power filter effectiveness concerning its influence on apparent power, reactive power and the distortion power.

**Results.** The active power filter energy quality performance is estimated qualitatively and quantitatively. Active power filter's converter currents are obtained as instantaneous values, rms and average values. Conduction and switching losses are calculated for 2-level and 3-level inverter based on active power filters circuit. New energy quality performance factors are defined as well as the active power filter efficiency. All the results obtained in the mathematical model are verified by the simulation model in Matlab Simulink software.

### Key words:

Northern areas power supply, reactive power compensation, distortion power compensation, active power filter mathematical model, active power filter efficiency calculation.

### REFERENCES

- Berdin V.Kh., Kokorin A.O., Yulkin G.M., Yulkin M.A. *Vozobnovlyaemye istochniki energii v izolirovannykh naselednykh punktakh Rossiyskoy Arktiki* [Renewable energy sources in isolated settlements of the Northern areas]. Moscow, World Wild Fund Publ., 2017. 80 p.
- Postanovlenie pravitelstva Rossiyskoy Federatsii № 198 ot 7 maya 2000 g. [Decree of the Russian Government No. 198 from 07.05.2000]. *Ofitsialny internet-portal pravovoy informatsii* [Official decree of the Russian Government No 198 from 7 May 2000]. Available at:
- <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=201001273&rdk=&backlink=1> (accessed 21 October 2022).
- Gimdi V., Kurdin A., Nester D., Amiragyan A. *Energosnabzhenie izolirovannykh territoriy* [Power supply of the isolated areas]. *Energeticheskii byulleten analiticheskogo tsentra pri pravitelstve Rossiyskoy Federatsii*, August 2017, no. 51, pp. 28.
- Srednie tseny na benzin v gorodakh Rossii* [Average petrol prices in Russian cities]. Available at: <https://fuelprices.ru/ceny-na-benzin-v-gorodah-rossii> (accessed 21 October 2022).
- Tseny mesyatsa. Prilozhenie k zhurnalu «TEK Rossii»* [Month prices. Appendix of the journal «FEC of Russia»]. 2021, no. 12. Available at: [https://www.edu.ru/upload/medialibrary/54c/f0soj1ffdr4tse6ewhxiw8qz1kbikg5a/Prices\\_12\\_2021.pdf](https://www.edu.ru/upload/medialibrary/54c/f0soj1ffdr4tse6ewhxiw8qz1kbikg5a/Prices_12_2021.pdf) (accessed 21 October 2022).
- Zhezhelenko I.V., Shildovskiy A.K., Pivnyak G.G., Saenko Yu.L., Noyberger N.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost potrebiteley. Monografiya* [Electromagnetic compatibility of consumers. Monography]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 351 p.
- Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beatty H.W. *Electrical Power Systems Quality*. New York, McGraw-Hill Education, 2004. 521 p.
- Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiiy* [Higher harmonics in the industrial power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 4<sup>th</sup> ed. 331 p.
- Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Energy quality performance and its control in industry]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
- Khan S., Singh B., Makhija P. A review on power quality problems and its improvement techniques. *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. Vellore, 2017. pp. 1–7.
- Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Power losses. Reactive power. Power quality: practical calculations manual]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p.
- Perechen kriticheskikh tekhnologiy Rossiyskoy Federatsii ot 7 iyulya 2011 goda [Critical Technologies List of Russian Federation from 07.07.2011]. *Official website of the Russia President Administration*. Available at: <http://kremlin.ru/supplement/988> (accessed 21 October 2022).
- Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda [Russia's Energy Strategy till 2035]. *Official website of the Russian's*

- Government Analytical Center*. Available at: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf> (accessed 21 October 2022).
15. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Razvitie energetiki» v redaktsii ot 18.10.2019 № 321 [State Program of Russian Federation «Energetics development» 18.10.2019 edition]. *Official website of the Russian's Government Law Information*. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102424400&backlink=1&&nd=102349663> (accessed 21 October 2022).
  16. Abramovich B.N., Sychev Y.A. The evaluation of hybrid active filter efficiency. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, Russia, 2016. pp. 1–7.
  17. Plakhtii O., Nerubatskiy V., Scherbak Ya., Mashura A., Khomenko I. Energy efficiency criterion of Power Active Filter in a three-phase network. *IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020. pp. 165–170.
  18. Wang L., Lam C.-S., Wong M.-C. The analysis of DC-link voltage, compensation range, cost, reliability and power loss for shunt (hybrid) active power filters. *2018 IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Sabah, Malaysia, 2018. pp. 640–645.
  19. Yadav S.K., Patel A., Mathur H.D. Study on comparison of power losses between UPQC and UPQC-DG. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, vol. 58, no. 6, pp. 7384–7395.
  20. Dybko M.A., Brovanov S.V. A New method of current calculation in power semiconductor devices of diode-clamped multilevel VSC. *Proc. of 3<sup>rd</sup> International Youth Conference on Energetics, IYCE 2011*. Leiria, Portugal, July 7–9, 2011. pp. 1–7.
  21. Brovanov S.V., Dybko M.A. Raschet dinamiceskikh poter v mnogourovnevnykh poluprovodnikovykh preobrazovatelyakh s emkostnym delitelem napryazheniya [Switching losses calculation in multilevel NPC inverters]. *Doklady akademii nauk vysshey shkoly RF*, 2011, no. 2 (17), pp. 46–55.
  22. Dybko M.A., Grishanov E.V., Brovanov S.V., Tokarev V.G. Metodika rascheta dinamiceskikh poter moshchnosti v poluprovodnikovykh preobrazovatelyakh na tranzistorakh tipa MOSFET s vektornym sposobom upravleniya [Switching losses calculation technique in MOSFET VSI with space vector control]. *Doklady AN VSH RF*, 2017, no. 3 (36), pp. 52–63.
  23. Artal-Sevil J.S., Lujano-Rojas J.M., Bernal-Ruiz C., Gorra-chategui I.S. Analysis of power losses in a three-phase inverter 3L-NPC. Comparison with different PWM modulation techniques. *XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE)*. La Laguna, Spain, 2018. pp. 1–9.
  24. Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. *8<sup>th</sup> International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. Algiers, Algeria, 2016. pp. 768–773.
  25. Hafezi H., Faranda R. A new approach for power losses evaluation of IGBT/diode module. *MDPI Electronics*, 2021, vol. 10, no. 3:280, pp. 1–22.
  26. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Energy loss analysis in a SiC/IGBT propulsion inverter over drive cycles considering blanking time, MOSFET's reverse conduction and the effect of thermal feedback. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Detroit, MI, USA, 2020. pp. 1505–1511.
  27. Feix G., Dieckerhoff S., Allmeling J., Schonberger J. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses. *13<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*. Barcelona, Spain, 2009. pp. 1–8.
  28. Babaie A., Karami B., Abrishamifar A. Improved equations of switching loss and conduction loss in SPWM multilevel inverters. *7<sup>th</sup> Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)*. Tehran, Iran, 2016. pp. 559–564.
  29. Xi C., Shenghua H., Bingzhang L., Yangxiao X. Losses and thermal calculation of IGBT and FWD in PWM inverter for electric engineering maintenance rolling stock. *19<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Chiba, Japan, 2016. pp. 1–5.
  30. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Power loss analysis in a SiC/IGBT propulsion inverter including blanking time, MOSFET's reverse conduction and the effect of thermal feedback using a PMSM model. *IECON The 46<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, 2020. pp. 1424–1430.
  31. *Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules*. Application Note AN 1403, 19.08.2014. Available at: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-note-determining-switching-losses-of-semikron-igbt-modules-en-2014-08-19-rev-00/> (accessed 27 October 2022).
  32. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. IEEE Press series on power engineering. New Jersey, John Wiley & Sons, 2017. 432 p.
  33. Infineon FF300R12ME7\_B11. *IGBT module datasheet*. Available at: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF300R12ME7\\_B11-DataSheet-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4627aa5d4f5017b10ad70463236](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF300R12ME7_B11-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4627aa5d4f5017b10ad70463236) (accessed 27 October 2022).
  34. Budeanu C.I. *The different options and conceptions regarding active power in nonsinusoidal systems*. Bucharest, Instytut Român de l'Energie, 1927.
  35. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of power theory. *International school on nonsinusoidal currents and compensation*. Lagow, Poland, 2008. pp. 1–11.

Received: 5 November 2022.  
Reviewed: 17 February 2023.

#### Information about the authors

**Maksim A. Dybko**, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.



УДК 532.546

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОвого ПОЛЯ В СКВАЖИНЕ ПРИ ЗАКОЛОННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ПРОЦЕССЕ ИНДУКЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Давлетшин Филлус Фанизович<sup>1</sup>,  
felix8047@mail.ru

Рамазанов Айрат Шайхуллович<sup>1</sup>,  
ramaz@geotec.ru

Акчурин Руслан Зуфарович<sup>1</sup>,  
ac4urin.ruslan@yandex.ru

Шарафутдинов Рамиль Фаизырович<sup>1</sup>,  
gframail@inbox.ru

Исламов Денис Фавилович<sup>1</sup>,  
islamovden@rambler.ru

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий,  
Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

**Актуальность.** Одним из перспективных методов промыслово-геофизических исследований скважин является активная термометрия. Технология проведения исследований данным методом включает локальный индукционный нагрев металлической обсадной колонны, регистрацию и анализ изменения температуры колонны. При некачественном цементировании скважин возможно возникновение потока жидкости в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом (заколонного перетока). По каналу перетока в скважину поступает вода из непродуктивных пластов, что снижает рентабельность добычи нефти. В этой связи своевременное выявление и ликвидация заколонных перетоков является важной задачей эффективной эксплуатации скважин. При индукционном нагреве обсадной колонны в потоке жидкости, движущейся в канале заколонного перетока, благодаря теплообмену с нагретым участком колонны возникает тепловое возмущение, которое может быть использовано для выявления наличия перетока.

**Объект:** добывающая скважина, в которой проводятся исследования методом активной термометрии с помощью локального индукционного нагрева обсадной колонны.

**Цель:** разработка математической модели расчета теплового поля, вызванного индукционным нагревом участка металлической обсадной колонны, с учетом движения жидкости в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом (заколонного перетока); получение аналитических решений для расчета температуры обсадной колонны и жидкости в канале перетока; исследование особенностей формирования температурного поля в колонне и жидкости в канале перетока в процессе индукционного нагрева, а также влияния расхода жидкости в канале перетока на тепловое поле в обсадной колонне.

**Методы:** метод интегрального преобразования Лапласа по времени и численный алгоритм Стеффеста с целью получения аналитических решений для расчета температурного поля; сравнение результатов расчетов по аналитической модели с результатами численного моделирования в программном пакете Ansys Fluent (Лицензия ANSYS Academic Research CFD в рамках договора с Башкирским государственным университетом от 15.06.2020).

**Результаты.** Методом интегральных преобразований Лапласа получены новые аналитические решения для расчета нестационарного поля температуры в скважине при индукционном нагреве участка металлической обсадной колонны с учетом потока жидкости в кольцевом пространстве между колонной и цементным кольцом. Исследованы особенности формирования температурного поля в процессе нагрева и после отключения индуктора, показано, что в течение 20 минут нагрева температурные возмущения в жидкости, движущейся в канале перетока, и обсадной колонне распространяются по направлению потока на расстояние более 2 м. Показано, что рост температуры колонны на расстояниях порядка 1–2 м выше интервала индукционного нагрева связан с теплоотдачей от нагретого флюида в канале заколонного перетока. Критерий роста температуры обсадной колонны на расстояниях 1–2 м относительно интервала индукционного нагрева может быть использован как признак заколонного движения жидкости. Исследовано влияние скорости (расхода) жидкости в канале перетока на характер формирования температуры колонны в процессе индукционного нагрева. Показано, что увеличение расхода жидкости в канале перетока при прочих равных условиях приводит к росту скорости распространения температурных возмущений в теле обсадной колонны, а также к снижению величины разогрева колонны вследствие роста интенсивности оттока тепла из интервала работы индуктора. Выполнено сравнение результатов расчетов по аналитической модели с результатами моделирования в программном пакете Ansys Fluent, установлено, что расчетные температуры колонны и жидкости несколько завышены по сравнению с численным решением в связи с применением упрощающих допущений в рамках аналитической модели.

### Ключевые слова:

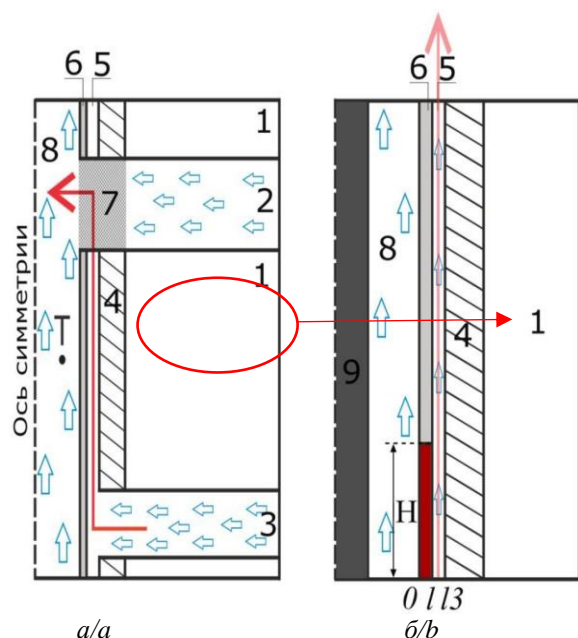
активная термометрия, индукционный нагрев, нестационарное температурное поле, преобразования Лапласа, алгоритм Стеффеста, тепловая метка, температурное возмущение.

### Введение

Своевременный контроль работы скважин является важным условием обеспечения эффективной раз-

работки месторождений нефти и газа. Для мониторинга скважин широкое распространение получили геофизические методы исследования. Одним из

наиболее информативных методов геофизического контроля за разработкой является скважинная термометрия, основанная на измерении температуры в стволе скважины. Температурные эффекты, связанные с притоком жидкости из пластов в скважину, восходящими или нисходящими газожидкостными потоками в стволе скважины, могут быть успешно использованы для решения практических задач контроля за разработкой месторождений: выделения мест (интервалов глубин) притока флюида из пластов, оценки расхода флюида в стволе скважине, определения наличия заколонных перетоков за обсадной колонной [1, 2]. Схема течения пластовой жидкости в процессе работы скважины представлена схематично на рис. 1, а. На рис. 1, б показана геометрия задачи при математическом моделировании индукционного нагрева обсадной колонны, при этом в скважину в интервал исследования (между пластами 2 и 3) опускается скважинный прибор с индуктором – 9.



**Рис. 1.** а) схема движения жидкости при заколонном перетоке; б) геометрия задачи ( $H$  – длина участка индукционного нагрева,  $l$  – толщина обсадной колонны,  $l_3$  – положение поверхности контакта «жидкость в канале перетока – цементное кольцо», стрелками показано направление движения жидкости); 1 – горные породы, 2 – перфорированный пласт, 3 – неперфорированный пласт, 4 – цементное кольцо, 5 – канал перетока, 6 – металлическая обсадная колонна, 7 – интервал перфорации, 8 – поток жидкости в обсадной колонне,  $T$  – датчик температуры

**Fig. 1.** a) diagram of liquid flow during the flow behind the column; b) geometry of the problem ( $H$  is the length of the induction heating section,  $l$  is the thickness of the casing,  $l_3$  is the position of the contact surface «flow channel behind the column – cement ring», the arrows show the direction of fluid flow); 1 – rocks, 2 – perforated formation, 3 – non-perforated formation, 4 – cement ring, 5 – flow channel, 6 – metal casing, 7 – perforation interval, 8 – fluid flow in the casing,  $T$  – temperature sensor

Скважина представляет собой цилиндрическую горную выработку, вскрывающую пласты – 2 и 3. Выше и ниже проницаемых пластов 2, 3 залегают непроницаемые горные породы – 1. Цементное кольцо – 4 и обсадная колонна – 6 служат для укрепления стенок скважины. Обсадная колонна – 6 представляет собой последовательно соединенную колонну гладких труб круглого поперечного сечения. Интервал перфорации – 7 содержит специальные отверстия в обсадной колонне и цементном кольце, восстанавливающие гидродинамическую связь между пластом – 2 и скважиной после ее обсадки – спуска в скважину колонны обсадных труб и ее наружного цементирования. Пласт – 2 сообщается со скважиной благодаря перфорационным отверстиям – 7, пласт – 3 предполагается изолированным (как правило, изолируются водонасыщенные пласты, в которых нефть отсутствует). Ось скважины (цилиндра) совпадает с осью симметрии. Жидкость фильтруется через проницаемый пористый пласт – 2 и поступает в ствол скважины, формируя восходящий поток – 8, течение жидкости в стволе скважины ниже пласта – 2 обусловлено работой других пластов (не показаны на рисунке). При некачественном цементировании скважины возможно возникновение потока жидкости в кольцевом пространстве – 5 между цементным кольцом – 4 и обсадной колонной – 6. Поток жидкости в заколонном пространстве обозначают термином «заколонный переток», кольцевое пространство – термином «канал (заколонного) перетока». Вследствие наличия заколонного перетока жидкость из пласта – 3, который предполагалось изолировать (водонасыщенный пласт), поступает в ствол скважины. Увеличение доли воды в откачиваемой из скважины продукции снижает рентабельность добычи нефти, в этой связи своевременное выявление и ликвидация заколонных перетоков является важной задачей эффективной эксплуатации скважин.

Ограничением традиционной термометрии является малость регистрируемых температурных возмущений (сотые доли градуса). Перспективным направлением совершенствования традиционной термометрии является метод активной термометрии. Он основан на создании искусственного теплового поля в скважине, генерируемого скважинным индукционным нагревателем. Индукционное воздействие обуславливает нагрев участка металлической обсадной колонны. Благодаря процессам конвекции и теплопроводности при контакте с нагретым металлом разогреваются также жидкость в колонне и заколонном пространстве. При интенсивном кратковременном нагреве в жидкости создается тепловая метка, величина которой может достигать нескольких градусов. Регистрация и анализ температурных возмущений, связанных с движением тепловых меток, является основой решения важных практических задач, связанных с выявлением наличия заколонного перетока [3, 4].

Несмотря на наличие ряда практических приложений метода активной термометрии, на сегодняшний день отсутствуют теоретические основы для применения индукционного воздействия при диагностике

заколонных перетоков в скважинах. В имеющихся работах представлены лишь отдельные примеры выявления заколонных перетоков методом индукционного нагрева на промысловых примерах, даны общие рекомендации по проведению исследований [5–23].

В данной работе представлены новые аналитические решения для расчета температуры обсадной колонны и жидкости в заколонном пространстве в процессе индукционного нагрева, изучены особенности формирования нестационарного температурного поля при наличии заколонного перетока.

#### Математическая модель для расчета температурного поля в скважине при индукционном воздействии

Рассмотрим математическую постановку задачи для расчета нестационарного поля температуры в скважине при индукционном нагреве участка обсадной колонны длиной  $H$  (рис. 1, б). Скважинный прибор с индуктором рассматривается как однородный цилиндр из непроводящего материала (углепластика), из которого выполнен корпус индуктора для исключения его индукционного разогрева (обозначение 9 на рис. 1). Обсадная колонна и индуктор расположены концентрично. Индуктор расположен вдоль оси скважины по всей длине участка моделирования, активная часть с индукционным нагревателем имеет длину  $H$ . Полагается, что тепловыделение в колонне происходит равномерно вдоль участка нагрева  $H$  [6]. Учитывается наличие потока жидкости, движущегося с постоянным расходом  $Q_3$  в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом, – заколонного перетока (обозначение 5 на рис. 1) и потока жидкости в обсадной колонне с постоянным расходом  $Q$  (обозначение 8 на рис. 1). Поток жидкости как в обсадной колонне, так и в канале перетока движется вертикально вверх. Теплофизические свойства цементного кольца и горных пород полагаются одинаковыми. В модели для расчета нестационарного температурного поля пренебрегаем:

- теплопроводностью в вертикальном направлении в теле обсадной колонны и в жидкости, движущейся в обсадной колонне и канале перетока. Данное допущение применяется в связи с тем, что в потоке жидкости конвективный теплоперенос преобладает над кондуктивным. В обсадной колонне вертикальную составляющую теплопроводности не учитываем из-за малой толщины стенки колонны, вследствие чего площадь боковой поверхности обсадной колонны существенно превышает площадь ее поперечного сечения, благодаря чему и поток тепла через боковую поверхность колонны больше, чем через плоскость ее поперечного сечения;
- изменением температуры восходящего потока в обсадной колонне. Полагаем, что в связи с большим расходом и, соответственно, скоростью конвективного теплопереноса жидкость не успевает существенно нагреваться при прохождении интервала индукционного нагрева;
- теплоемкостью скважинного прибора с индуктором, в связи с тем, что корпус индуктора выполнен из углепластика (его удельная теплоемкость

равна порядка 900 Дж/(кг·К), что в несколько раз ниже теплоемкости жидкости в обсадной колонне (табл. 1), кроме того, полагаем, что ввиду большого расхода жидкости в обсадной колонне тепло от нагретого металла уносится потоком жидкости в ней и не доходит до индуктора);

- тепловым расширением жидкости (расчетное изменение плотности жидкости при изменении температуры на величину формируемых тепловых возмущений составило не более 1 %);
- изменением температуры горных пород в вертикальном направлении (интересующая область моделирования составляет по вертикали около 2–3 м, изменение естественной (геотермической) температуры в данном диапазоне глубин составляет не более 0,1 К [7]).

Пусть  $T_1$  – температура жидкости в колонне;  $T_2(x, z, t)$  – температура металлической колонны;  $T_3(x, z, t)$  – среднemasсовая температура жидкости в канале заколонного перетока;  $T_4(x, z, t)$  – температура цемента и горных пород. Для тела обсадной колонны записывается уравнение теплопроводности с учетом теплового источника, обусловленного тепловыделением в колонне [8, 9]

$$C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \varphi(x, z, t), \quad 0 \leq x \leq l, \quad (1)$$

где  $C_2 = \rho_2 c_2$  – объемная теплоемкость колонны;  $\rho_2, c_2, \lambda_2$  – соответственно плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность материала колонны;  $\varphi(x, z, t)$  – удельная на единицу объема мощность тепловыделения в колонне;  $l$  – толщина обсадной колонны. От  $T_2(x, z, t)$  перейдем к средней по толщине колонны температуре

$$T(z, t) = \frac{1}{l} \int_0^l T_2(x, z, t) dx;$$

$$w(z, t) = \frac{1}{l} \int_0^l \varphi(x, z, t) dx, \quad (2)$$

С учётом (2) уравнение (1) перепишется как

$$l C_2 \frac{\partial T}{\partial t} = q(0, t) - q(l, t) + l w(z, t), \quad (3)$$

где тепловые потоки на границе металла с жидкостью  $q(0, t)$  и потоком в заколонном пространстве  $q(l, t)$  рассчитываются как [10]:

$$q(0, t) = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha(T_1 - T);$$

$$q(l, t) = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=l} = -\beta(T_3 - T), \quad (4)$$

где  $T$  – средняя по толщине температура металлической колонны;  $T_1$  – среднemasсовая температура жидкости в колонне;  $T_3$  – среднemasсовая температура жидкости в канале заколонного перетока;  $\alpha, \beta$  – коэффициенты теплоотдачи.

Уравнение конвективного теплопереноса в жидкости, движущейся в заколонном пространстве [11, 12]:

$$A_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} + C_3 Q_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = 2\pi R \alpha (T - T_3) + 2\pi R_3 q_3, \quad (5)$$

где  $A_3$  – площадь поперечного сечения потока;  $C_3 = \rho_3 c_3$  – объемная теплоемкость жидкости,  $\rho_3, c_3$  – соответственно плотность, удельная теплоемкость жидкости;  $Q_3$  – объемный расход жидкости в заколонном пространстве;  $R$  – внешний радиус обсадной колонны;  $R_3$  – радиус поверхности контакта «жидкость в ЗКЦ – цемент»;  $q_3$  – тепловой поток от жидкости в заколонном пространстве в цемент и горные породы, который рассчитывается из условия равенства тепловых потоков на границе «жидкость в ЗКЦ – цемент»:

$$q_3 = -\lambda_4 \left. \frac{\partial T_4}{\partial x} \right|_{x=l_3}, \quad (6)$$

где  $l_3$  – линейная координата поверхности контакта «жидкость в ЗКЦ – цемент»;  $\lambda_4$  – теплопроводность горных пород.

Линейный одномерный тепловой поток в цементе и горной породе рассчитывается из решения уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T_4}{\partial t} = a_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}, \quad x > l_3, \quad (7)$$

где  $a_4$  – температуропроводность цемента и горных пород.

Начальные и граничные условия (за вычетом начальной постоянной температуры): в момент времени  $t=0$  температура в колонне равна начальной  $T_0$ , соответствующей температуре восходящих потоков в обсадной колонне и канале заколонного перетока на входе в расчетную область

$$\begin{aligned} \theta_1 = (T - T_0)|_{t=0} &= 0; \\ \theta_3 = (T_3 - T_0)|_{z=0} &= 0; \\ \theta_3|_{t=0} = (T_3 - T_0)|_{t=0} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

#### Аналитическое решение

Для решения системы уравнений (3)–(8) применяется метод преобразований Лапласа [13]. Преобразования Лапласа выполняются по времени для уравнений (3), (5), (7). Изображения функций  $T, T_3, T_4$  обозначим как  $F, F_3$  и  $F_4$  соответственно. Решение для функции  $T_4$  (уравнение (7)) в изображениях Лапласа (9) в предположении, что температура на границе «жидкость в канале перетока – цементное кольцо» соответствует среднемассовой температуре жидкости в канале перетока  $F_3$ , имеет вид [14]:

$$F_4(x, s, z) = F_3(s, z) e^{-\sqrt{\frac{s}{a_4}}(x-l_3)}. \quad (9)$$

В пространстве изображений уравнения (3) и (5) запишутся как:

$$\begin{aligned} lC_2 s F &= \alpha \left( \frac{\theta_1}{s} - F \right) + \beta (F_3 - F) + l w_L(s, z); \\ A_3 C_3 s F_3 + C_3 Q_3 \frac{\partial F_3}{\partial z} &= 2\pi R \alpha (F - F_3) - 2\pi R_3 \lambda_3 \sqrt{\frac{s}{a_4}} F_3, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $w_L$  – функция с изображение  $w$ . Температуру жидкости в колонне (за вычетом начальной постоянной

температуры), аналогично (8), примем равной нулю  $\theta_1=0$ .

Из первого уравнения в (10) выразим  $F$  через  $F_3$ :

$$\begin{aligned} F &= \frac{\beta}{B(s)} F_3 + \frac{l w_L(s, z)}{B(s)}; \\ B(s) &= \alpha + \beta + C_2 l s. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставив (11) во второе из уравнений (10) и учитывая граничное условие (8), получим задачу Коши для функции  $F_3(s, z)$ :

$$\begin{aligned} \frac{dF_3}{dz} + A(s) F_3 &= D(s) w_L(s, z); \\ F_3|_{z=0} &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где функции  $A(s)$  и  $D(s)$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} A(s) &= \frac{1}{C_3 Q_3} \left( A_3 C_3 + 2\pi R \beta \left( 1 - \frac{\beta}{B(s)} + \frac{\lambda_3 R_3}{R \beta} \sqrt{\frac{s}{a_4}} \right) \right); \\ D(s) &= \frac{2\pi R \beta l}{C_3 Q_3 B(s)}. \end{aligned}$$

Решение (12) ищем в виде функции

$$F_3 = C(z) e^{-A(s)z}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (12), после несложных преобразований получим решение

$$F_3 = \begin{cases} \frac{D(s) w_L(s, z)}{A(s)} (1 - e^{-A(s)z}), & z \leq H; \\ \frac{D(s) w_L(s, z)}{A(s)} (e^{-A(s)(z-H)} - e^{-A(s)z}), & z > H, \end{cases} \quad (14)$$

где  $H$  – длина участка индукционного нагрева.

Решение в изображениях Лапласа для температуры обсадной колонны  $F$  запишется как

$$F = \frac{\beta}{B(s)} F_3 + \begin{cases} \frac{l w_L(s, z)}{B(s)}, & z \leq H; \\ 0, & z > H. \end{cases} \quad (15)$$

Для периода нагрева при постоянной удельной мощности тепловыделения на единицу объема  $W(t) = W = \text{const}$  изображение  $w_L$  имеет вид  $\frac{W}{s}$ . В общем случае с учетом периода работы длительностью  $t_w$  и дальнейшей остановки работы индуктора изображение запишется как

$$w_L = \int_0^{\infty} W \gamma(t \leq t_w) e^{-st} dt = \frac{W}{s} (1 - e^{-st_w}).$$

Для получения оригиналов функций (14) и (15) используется численный алгоритм Стефеста [15].

Для контроля корректности полученного аналитического решения проведено сравнение результатов расчетов разогрева жидкости  $\theta_3$  в канале заколонного перетока после прохождения интервала индукционного нагрева  $H$  со строгим аналитическим решением. Аналитическое выражение для расчета максимального разогрева жидкости при прохождении интервала индуктора получено согласно следующим соображе-

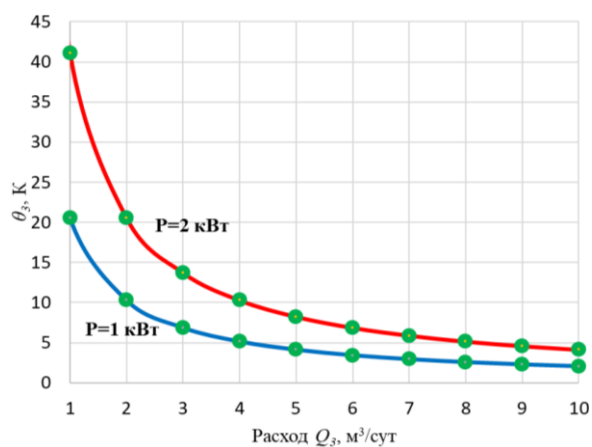
нием: после достижения теплового равновесия в колонне все тепло, выделяемое индуктором, отводится жидкостью. Выделяемая за время  $dt$  энергия, передаваемая жидкости в канале заколонного перетока:

$$Wdt = c\theta_3 \cdot dm = c_3\theta_3\rho_3Q_3dt, \quad (16)$$

где  $m_3$ ,  $\rho_3$ ,  $c_3$  – масса, плотность и удельная теплоемкость жидкости в канале перетока соответственно;  $Q_3$  – объемный расход жидкости;  $\theta_3$  – изменение температуры жидкости при прохождении интервала индуктора. Из (16) получаем формулу для расчета максимального разогрева жидкости:

$$\theta_3 = \frac{W}{\rho_3 c_3 Q_3}. \quad (17)$$

Для достижения аналогичной постановки в полученном методом преобразований Лапласа аналитическом решении обнуляли: тепловой поток от нагретого металла потоку жидкости в обсадной колонне, а также поток тепла от жидкости в канале заколонного перетока цементному кольцу и горным породам (для этого коэффициенты  $\alpha$ ,  $\lambda_3$  приравнивали нулю), длительность индукционного нагрева принимали достаточно большой (100 часов). Результаты расчета максимального нагрева жидкости в канале перетока в зависимости от мощности индукционного нагрева  $P$ , расхода жидкости в канале перетока  $Q_3$  представлены на рис. 2. Получено, что отклонение результатов расчетов по аналитическим решениям (17) не превышает 0,2 %.



**Рис. 2.** Сравнение результатов расчетов максимального нагрева жидкости  $\theta_3$  в канале заколонного перетока (точки – строгое аналитическое решение, линии – аналитическое решение на основе преобразований Лапласа)

**Fig. 2.** Comparison of the results of calculations of the maximum heating of the liquid  $\theta_3$  in the flow channel (points are a strict analytical solution, lines are an analytical solution based on Laplace transformations)

#### Анализ результатов расчетов

Геометрия рассматриваемой задачи включает несколько зон: поток жидкости в колонне (с постоянной температурой), металлическая обсадная колонна, поток в канале заколонного перетока, цементное кольцо и горные породы с отличающимися свойствами (теп-

лопроводностью  $\lambda$ , удельной теплоемкостью  $c$ , плотностью  $\rho$  (табл. 1), параметры взяты при температуре 60 °С (NIST, 2022), соответствующей типичной температуре в скважине на глубинах порядка 1000–1500 м, в которых проводятся геофизические исследования). Свойства жидкости соответствуют воде, что обусловлено значительным содержанием воды в добываемых скважинах в связи с переходом месторождений на позднюю стадию разработки (для поддержания пластового давления, падающего по мере добычи нефти, в скважины и пласты закачивается большое количество воды).

**Таблица 1.** Теплофизические свойства среды

**Table 1.** Thermophysical properties of the medium

Материал/Material	$\lambda$ Вт/(м·К) W/(m·K)	$c$ Дж/(кг·К) J/(kg·K)	$\rho$ кг/м³ kg/m³
Жидкость в колонне и заколонном пространстве (вода) Liquid in the string and annulus (water)	0,65	4185	983
Металл/Metal	50	500	8000
Цемент+горная порода Cement+rock	1,2	1000	2500
Углепластик (корпус индуктора, используется при численном моделировании в Ansys) Carbon fiber (inductor housing, used in numerical modeling in Ansys)	0,48	920	1500

Для расчета коэффициента теплоотдачи в работе используется следующая корреляция для числа Нуссельта (19) при вынужденной конвекции в трубе [16, 17]

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{d};$$

$$Nu = \begin{cases} 4,36, & Re \leq 2100; \\ Nu_{lam} + \frac{Nu_{turb} - Nu_{lam}}{Re_{turb} - Re_{lam}} (Re - Re_{lam}), & 2100 < Re < 10000; \\ 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3}, & Re \geq 10000, \end{cases} \quad (19)$$

где  $d$  – гидравлический диаметр;  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$  – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля соответственно;  $lam$ ,  $turb$  – ламинарный и турбулентный режимы соответственно;  $Re_{lam}=2100$ ,  $Re_{turb}=10000$ ,  $Nu_{lam}=4,36$ ,

$$Nu_{turb} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} \Big|_{Re=10000};$$

$$Re = \frac{\rho Qd}{A\mu};$$

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda},$$

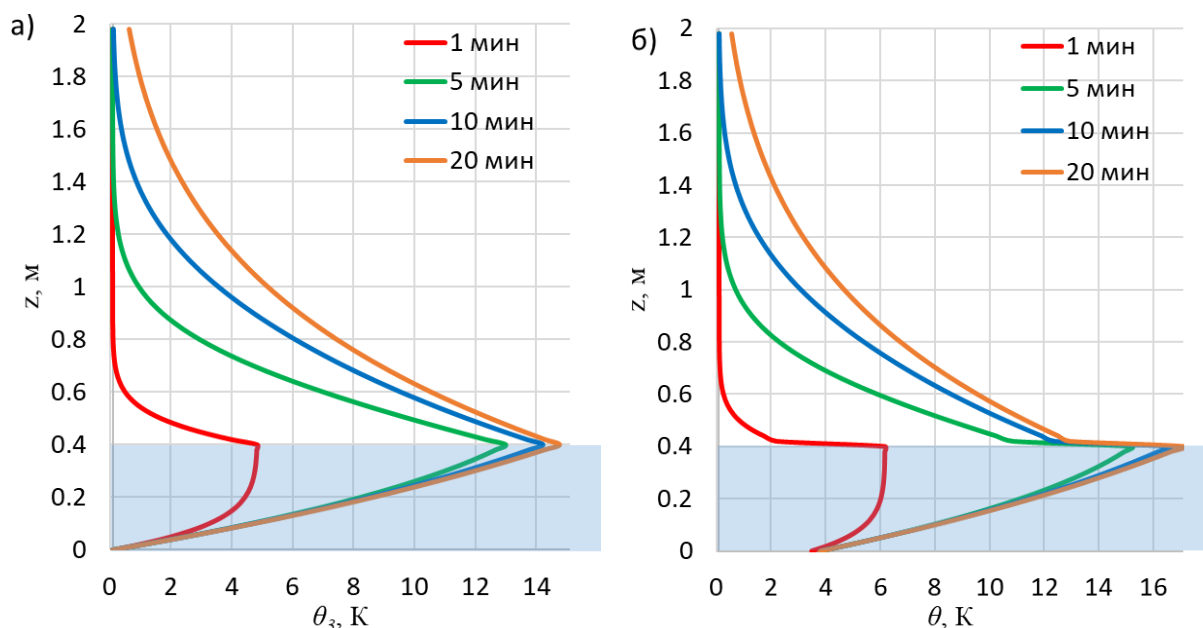
где  $\mu$ ,  $\lambda$  – динамическая вязкость и теплопроводность жидкости соответственно.

**Принятые в расчетах параметры:** внешний радиус обсадной колонны  $R=73,5$  мм, толщина стенки колонны  $l=10$  мм, радиус поверхности контакта «жидкость в ЗКЦ – цементное кольцо  $R_3=74,5$  мм (что соответствует толщине канала перетока 1 мм), длина участка индукционного нагрева  $H=0,4$  м, мощность индуктора, принимаемая равной мощности тепловыделения в колонне,  $P=1$  кВт, длительность цикла

нагрева  $t_w=20$  мин, длительность периода охлаждения (при выключенном индукторе) также равна 20 мин. Объемный расход жидкости в обсадной колонне  $Q_1=25$  м<sup>3</sup>/сут, в канале перетока  $Q_3=1$  м<sup>3</sup>/сут (данные значения расходов являются типичными для обводненных низкодебитных скважин). В общем случае расход в канале перетока зависит от диаметра канала перетока, перепада давления (разницы между пластовым давлением для пласта-источника перетока и давлением в скважине на глубине выхода в нее жидкости

из канала перетока), вязкости жидкости, длины канала перетока. Линейная скорость жидкости в обсадной колонне  $v_1=0,03$  м/с, в канале перетока  $v_3=0,025$  м/с, числа Рейнольдса  $Re$  равны соответственно 4360 (переходный режим течения) и 498 (ламинарный).

На рис. 3 показано формирование температурного поля в обсадной колонне и жидкости, движущейся в заколонном пространстве (жидкость в ЗКЦ), в процессе индукционного нагрева.



**Рис. 3.** Динамика распределения температуры в жидкости в канале перетока  $\theta_3$  (а) и обсадной колонне  $\theta$  (б) в процессе индукционного нагрева (шифр кривых – время после начала нагрева, цветом выделен интервал индукционного нагрева)

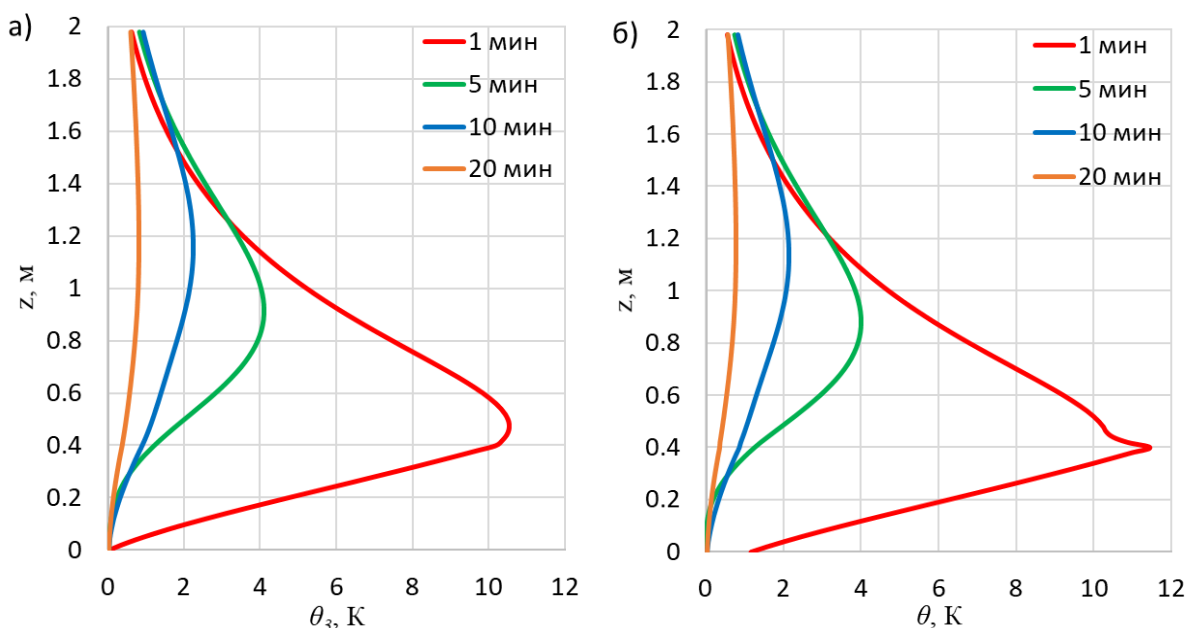
**Fig. 3.** Dynamics of temperature distribution in the liquid in flow channel  $\theta_3$  (a) and casing  $\theta$  (b) during induction heating (curve code – time after the start of heating, the induction heating interval is highlighted in color)

В течение 20 минут работы индуктора разогрев жидкости в заколонном пространстве и колонне достигает 14,6 и 17,0 К, соответственно. В процессе нагрева наблюдается «затяжка» температуры вверх: температурные возмущения не только в жидкости, но и в обсадной колонне распространяются по направлению потока на расстояние более 2 м, причем температурные кривые в жидкости и колонне хорошо согласуются друг с другом по форме. Передача тепла в жидкости обусловлена конвективным теплопереносом, в колонне же распространение возмущений тепла происходит за счет теплообмена с нагретым флюидом в канале заколонного перетока.

Динамика расформирования теплового поля в жидкости и колонне после остановки индукционного нагрева представлена на рис. 4. В процессе охлаждения температура обсадной колонны постепенно снижается за счет отвода теплоты восходящими потоками жидкости в колонне и канале перетока, в результате максимум температуры смещается вверх по потоку. Например, в колонне через 1, 5, 10, 20 мин положение максимума температуры (высота относи-

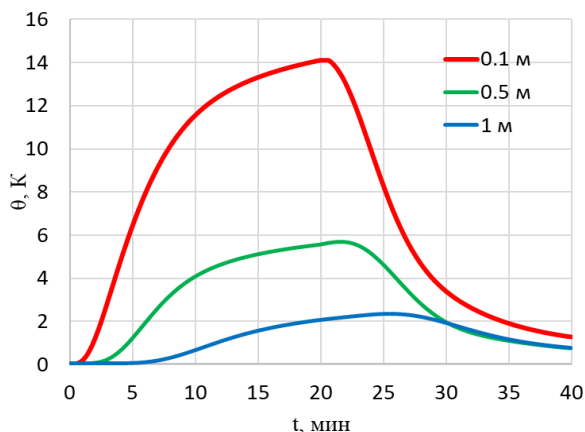
тельно верхней границы интервала нагрева 0,4 м) составляет 0, 0,48, 0,74, 0,78 м, соответственно, величины остаточных температурных возмущений составляют соответственно 11,4, 4,0, 2,1, 0,8 К. Изменения температуры в колонне и жидкости близки по величине, что связано с малой теплоемкостью жидкости, движущейся в узком канале между обсадной колонной и цементом.

Приведенные выше расчеты показывают, что температура обсадной колонны в значительной степени чувствительна к температурным возмущениям в заколонном пространстве, возникающим, в свою очередь, благодаря передаче тепла в интервале индукционного нагрева от нагретого металла к жидкости в канале перетока. Интересен вопрос взаимосвязи скорости (расхода) жидкости в заколонном пространстве и характера формирования температуры колонны. На рис. 5 представлена динамика температуры колонны в процессе нагрева и после отключения индуктора на различных высотах относительно верхней границы интервала нагрева.



**Рис. 4.** Динамика распределения температуры в жидкости (а) и обсадной колонне (б) после остановки индукционного нагрева (шифр кривых – время после остановки нагрева)

**Fig. 4.** Dynamics of temperature distribution in the liquid (a) and the casing (б) after stopping induction heating (curve cipher – time after stopping heating)



**Рис. 5.** Динамика температуры в колонне для различных точек выше интервала нагрева (шифр кривых – расстояние до верхней границы интервала нагрева)

**Fig. 5.** Temperature dynamics in the column for various points above the heating interval (curve cipher – distance to the upper limit of the heating interval)

Теплопроводность металла обсадной колонны равна около  $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , за 5 мин (300 с) моделирования возмущения тепла вдоль колонны за счет теплопроводности распространяются на расстояние порядка  $s = \sqrt{\pi \alpha t} = 0,1 \text{ м}$ ; за 20-минутный период нагрева фронт температурного возмущения, обусловленного теплопроводностью, проходит расстояние около 0,2 м. Выше показано, что возмущение тепла по колонне за счет теплоотдачи от потока нагретого флюида в канале перетока распространяется за 5 мин на расстояние порядка 1 м. Это показывает, что источником теплового возмущения в обсадной колонне на расстояниях порядка 1 м является поток в канале

перетока, что позволяет качественно использовать критерий роста температуры обсадной колонны на расстоянии 1–2 м выше интервала нагрева как признак заколонного движения жидкости. С точки зрения количественной оценки скорости потока в канале перетока ситуация сложнее: линейное расстояние, которое проходит поток жидкости в канале перетока за 5 мин, для рассматриваемого расхода в канале  $Q_3=1 \text{ м}^3/\text{сут}$ , составляет около 7,5 м. Таким образом, скорость распространения теплового возмущения существенно ниже линейной скорости потока в канале перетока, поскольку нагретому потоку в канале перетока выше интервала индукционного нагрева необходимо прогреть более холодные цементное кольцо, горные породы и обсадную колонну.

При увеличении расстояния до интервала нагрева величина температурных возмущений колонны снижается. Например, при увеличении расстояния до верхней границы интервала нагрева с 0,1 до 1 м максимальное изменение температуры колонны в процессе нагрева снижается с 11,2 до 2,3 К. В целом с увеличением расстояния до интервала нагрева отмечается запаздывание характера изменения температуры на кривых относительно друг друга, в частности, если на расстоянии 0,1 м температура колонны начинает снижаться практически сразу после отключения индуктора, то на расстояниях 0,5 и 1 м температура снижается только через 97 и 336 с, соответственно, после прекращения нагрева.

Увеличение расхода жидкости в канале перетока при прочих равных условиях (расход жидкости в обсадной колонне постоянен) приводит к росту скорости распространения температурных возмущений в колонне (рис. 6). Кроме того, при увеличении расхода жидкости в заколонном пространстве с 1 до  $5 \text{ м}^3/\text{сут}$

максимальный разогрев колонны снижается с 5,6 до 2,9 К, поскольку возрастает интенсивность оттока тепла из интервала индукционного нагрева. Критерий изменения температуры колонны при изменении расхода в канале перетока потенциально можно использовать для решения обратных задач по оценке расхода жидкости в канале перетока по замерам температуры стенки обсадной колонны.

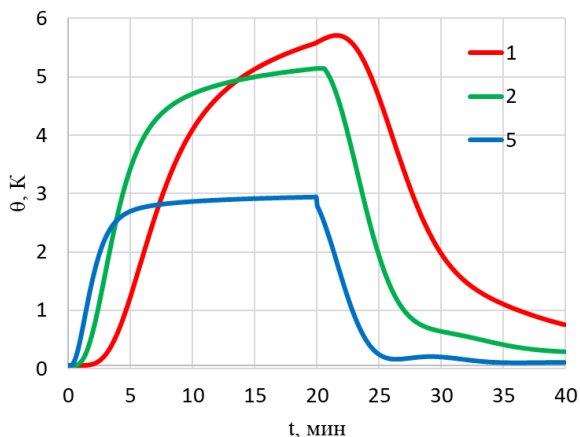


Рис. 6. Динамика температуры в колонне на 0,5 м выше интервала нагрева (шифр кривых – объемный расход жидкости в канале перетока, м<sup>3</sup>/сут)

Fig. 6. Temperature dynamics in the column is 0,5 m above the heating interval (the cipher of the curves is the liquid volume flow rate in the overflow channel, m<sup>3</sup>/day)

Расчеты с аналогичными параметрами (внешний радиус обсадной колонны  $R=73,5$  мм, толщина стенки колонны  $l=10$  мм, радиус поверхности контакта «жидкость в ЗКЦ – цементное кольцо  $R_3=74,5$  мм (что соответствует толщине канала перетока 1 мм), длина участка индукционного нагрева  $H=0,4$  м, мощность индуктора, принимаемая равной мощности тепловыделения в колонне,  $P=1$  кВт, длительность цикла нагрева  $t_w=20$  мин, длительность периода охлаждения (при выключенном индукторе) также равна 20 мин, объемный расход жидкости в обсадной колонне  $Q_1=25$  м<sup>3</sup>/сут, в канале перетока  $Q_3=1$  м<sup>3</sup>/сут, теплофизические параметры жидкости, обсадной колонны, свойства индуктора представлены в табл. 1) были выполнены с использованием CFD (*Computational Fluid Dynamics*) моделирования в программном пакете Ansys Fluent. При CFD моделировании учтено изменение температуры по радиусу и вертикали в жидкости, движущейся в колонне и канале заколонного перетока, металлической колонне, цементе и горных породах. Учитывается также вертикальная теплопроводность и теплоемкость индуктора. Начальная температура равна температуре на внешней границе модели и является постоянной величиной. На входе модели задается постоянная температура  $T$  и скорость потока  $v$  в колонне и канале заколонного перетока, на выходе задается граничное условие по давлению  $p$ . На остальных границах задается условие отсутствия теплового потока. В области индуктора, колонны, цемента и горных пород решается уравнение теплопровод-

ности (с учетом тепловыделения в колонне), для жидкости в колонне и канале заколонного перетока решаются уравнения Навье–Стокса для несжимаемой жидкости. Для численного решения уравнений Навье–Стокса используется метод (схема) PISO – алгоритм, входящий в семейство алгоритмов SIMPLE (в сравнении с SIMPLE он основан на более высокой степени приближенного соотношения между поправками на давление и скорость). Для пространственной дискретизации конвективных членов была выбрана схема QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics), которая имеет третий порядок точности на четырехугольных сетках. При расчете градиентов для вычисления диффузионных членов и производных скоростей используется способ Green-Gauss Node Based. Для вычисления градиента давления выбрана схема PRESTO!, которая используется для сильно закрученных течений и течений с большими градиентами. Для моделирования турбулентных течений в обсадной колонне используется модель переноса сдвиговых напряжений (SST k- $\omega$ ) [18].

На рис. 7 приведено сравнение распределений температуры колонны и жидкости в канале перетока после двадцатиминутного индукционного нагрева, полученных по численной и аналитической моделям.

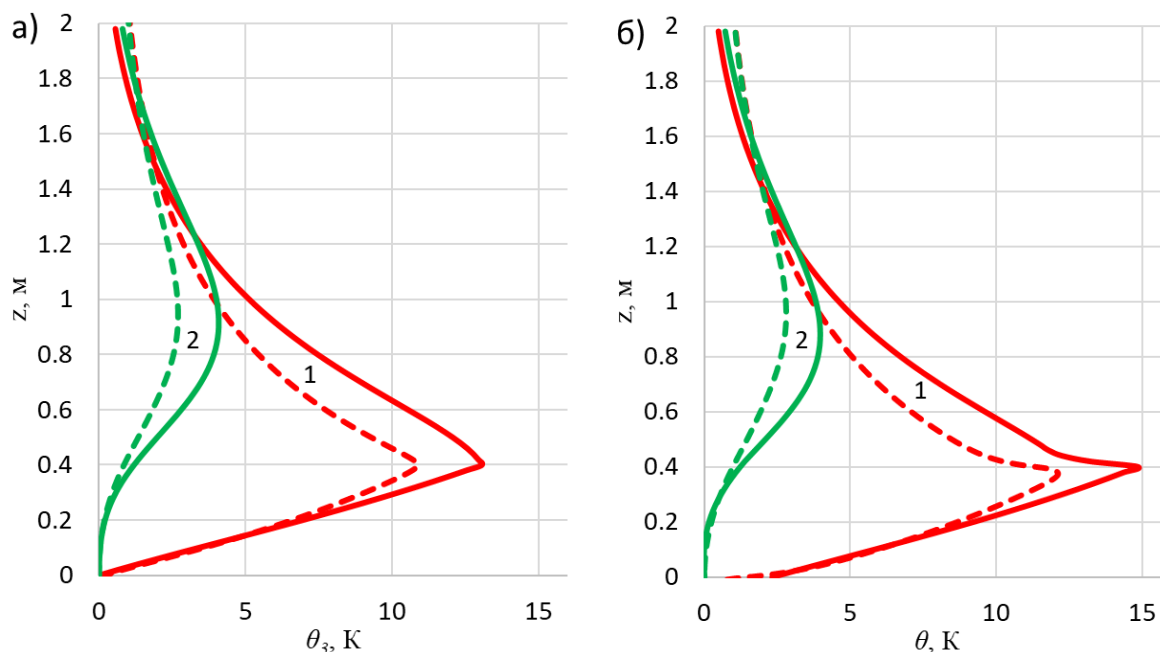
Видно, что кривые в целом хорошо согласуются друг с другом по форме, по аналитической модели температура колонны несколько выше, чем по численной, максимальная разница температур составляет около 2,1 К (19 %) для жидкости и 2,5 К (20 %) для колонны. Выше и ниже области максимальных тепловых возмущений кривые приближаются друг к другу, отклонения по температуре не превышают нескольких десятых долей К. Различие между кривыми можно объяснить неучетом вертикальной теплопроводности в металлической колонне по аналитической модели, приводящей к завышению температуры, использованием корреляций для описания теплообмена между металлом и потоками в колонне и заколонном пространстве, одномерных приближений уравнений теплопереноса.

Сопоставление результатов расчетов по аналитической модели с результатами CFD моделирования показывает, что полученные аналитические решения могут использоваться при прогнозном расчете температурного поля в стволе скважины в процессе индукционного нагрева при наличии заколонных перетоков, для оценки расхода жидкости в канале заколонного перетока.

#### Заключение

Получены новые аналитические решения для расчета нестационарного поля температуры в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны с учетом наличия заколонного перетока в пространстве между колонной и цементным кольцом. Методом интегрального преобразования Лапласа по времени получены аналитические решения в изображениях для температуры обсадной колонны и жидкости в канале перетока, для нахождения оригиналов использован численный алгоритм Стефеста.





**Рис. 7.** Распределение температуры в жидкости (а) и колонне (б) через 10 с (1) и 5 мин (2) после остановки индукционного нагрева (сплошная линия – аналитическая модель, штриховая – CFD-расчет)

**Fig. 7.** Temperature distribution in the liquid (a) and the column (б) in 10 s (1) and 5 min (2) after stopping the induction heating (solid line – analytical model, dashed line – CFD calculation)

Исследованы особенности формирования нестационарного поля температуры в колонне и жидкости в процессе нагрева и после отключения индуктора. Показано, что в течение 20 минут работы индуктора температурные возмущения как в жидкости в канале перетока, так и в самой колонне распространяются вверх по потоку на расстояние более 2 м. За 20-минутный период нагрева фронт температурного возмущения, обусловленного теплопроводностью, проходит вдоль обсадной колонны расстояние около 0,2 м. Таким образом, рост температуры колонны на расстояниях порядка 1–2 м выше интервала индукционного нагрева связан не с кондуктивным теплопереносом вдоль колонны, а с теплоотдачей от нагретого флюида в канале заколонного перетока, что позволяет качественно использовать критерий роста температуры обсадной колонны как признак заколонного движения жидкости.

Исследовано влияние скорости (расхода) жидкости в заколонном пространстве на характер формирования температуры колонны в процессе индукционного нагрева, показано, что увеличение расхода жидкости в канале перетока при прочих равных условиях приводит к росту скорости распространения тепловых возмущений в колонне. Установлено, что увеличение расхода жидкости в канале перетока обуславливает снижение разогрева колонны вследствие роста интенсивности оттока тепла из интервала работы индуктора: для принятых при моделировании условиях при увеличении расхода в канале перетока от 1 до

5 м<sup>3</sup>/сут максимальный разогрев колонны снизился с 5,6 до 2,9 К. Чувствительность температуры колонны к расходу в канале перетока потенциально можно использовать для решения обратных задач по оценке расхода жидкости в канале перетока по замерам температуры стенки обсадной колонны.

Сравнение результатов расчетов по аналитической модели с результатами моделирования в программном пакете Ansys Fluent показало, что расчетные температуры колонны и жидкости несколько завышены по сравнению с численным решением, что связано с неучетом вертикальной теплопроводности в колонне в рамках аналитического решения, а также с использованием корреляций для описания теплообмена между металлом и потоками в колонне и заколонном пространстве, одномерных приближений уравнений теплопереноса. Показано, что полученные аналитические решения могут использоваться при прогнозном расчете температурного поля в скважине в процессе индукционного нагрева колонны при наличии заколонных перетоков, для оценки расхода жидкости в канале перетока.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по теме: «Создание интеллектуальной комплексной технологии исследования и интерпретации данных промышленно-геофизических исследований скважин, включая оптоволоконные измерения для контроля за разработкой нефтегазовых месторождений ...», соглашение № 075-11-2021-061 от 25 июня 2021 г.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиуллин Р.А., Яруллин Р.К. Особенности геофизических исследований действующих горизонтальных скважин // Вест-

ник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – № 1. – С. 21–28.

2. Ипатов А.И., Кременецкий М.И. Проблемы промышленно-геофизического контроля в условиях «новой экономической

- политики // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2022. – Т. 37. – № 2. – С. 87–99.
3. Гаязов М.С., Валиуллин Р.А., Яруллин Р.К. Применение метода регулярных температурных меток для измерения фазовых расходов в низкодебитных горизонтальных скважинах // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 150–165.
  4. Способ активной термометрии действующих скважин (варианты): пат. Рос. Федерации № 2194160, заявл. 22.01.2001; опубл. 10.12.2002. – 5 с.
  5. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment / R.A. Valiullin, R.F. Sharafutdinov, A.Sh. Ramazanov, A.A. Shilov // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 157724, SPE Heavy Oil Conference. – Calgary, Alberta, Canada, 12–14 June 2012. – P. 1–7.
  6. Канафин И.В., Космылин Д.В. Изучение формирования теплового поля на модели скважины с локальным нагревом // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017. – № 2. – С. 44–48.
  7. Turcotte D.L., Schubert G. Geodynamics. – Cambridge, England, UK: Cambridge University Press, 2002. – 187 p.
  8. Fundamentals of heat and mass transfer. 8<sup>th</sup> ed. / Th.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. DeWitt. – St. Joseph County: University of Notre Dame, Indiana, USA, 2006. – 1070 p.
  9. Теплообмен цилиндрического тела с каталитической поверхностью при обтекании потоком дозвуковой неравновесной воздушной плазмы / А.И. Брызгалов, С.А. Васильевский, А.Ф. Колесников, С.Е. Якуш // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2022. – № 5. – С. 94–112.
  10. Марков А.А. Газодинамические и тепловые эффекты синтеза микронных частиц методом горения углерода в прямоточном и трехзонном реакторе // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2022. – № 3. – С. 17–29.
  11. Hasan A.R., Kabir C.S. Fluid flow and heat transfer in wellbores. – Richardson: Soc. Petrol. Eng., 2002. – 175 p.
  12. Ахметова О.В., Филиппов А.И., Шабаров А.Б. Температурное поле турбулентного потока в скважине с учетом зависимости теплоемкости от температуры // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56. – № 4. – С. 588–595.
  13. Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. Нестационарная фильтрация в пласте с трещиной гидроразрыва // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2019. – № 5. – С. 6–14.
  14. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
  15. Порошина Н.И., Рябов В.М. О методах обращения преобразования Лапласа // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2011. – Т. 44. – № 3. – С. 55–64.
  16. McEligot D.M., Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandtl-number gas mixtures // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1996. – V. 39. – P. 1287–1295.
  17. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
  18. ANSYSR1 Documentation, Fluent Theory Guide. – Southpointe: ANSYS Inc, 2022. – 1036 p.
  19. Application of active temperature logging at oilfields of Russia / R.F. Sharafutdinov, R.A. Valiullin, A.Sh. Ramazanov, V.Ya. Fedotov, A.A. Sadretdinov, M.F. Zakirov // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 161982, SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 16–18 October 2012. – P. 1–10.
  20. Inverse model for the control of induction heat treatments / M.Z. Asadzadeh, P. Raninger, P. Prevedel, W. Ecker, M. Mücke // Materials. – 2019. – № 12. – P. 1–15.
  21. Mathematical and computer simulation technology of condensate oil and gas wells stimulated by electromagnetic heating / C. Pu, R. Pei, H. Huang, J. Feng, G.H. Su // Journal of Hydrodynamics. – 2007. – V. 19. – № 3. – P. 292–302.
  22. Experimental and numerical study of the effect of coil structure on induction nitriding temperature field / K. Song, J. Guan, J. Liu, K. Li // Advances in Mechanical Engineering. – 2020. – V. 12. – № 7. – P. 1–14.
  23. Optimal control for a phase field model of melting arising from inductive heating / Z. Xiong, W. Wei, Y. Zhou, Y. Wang, Y. Liao // AIMS Mathematics. – 2021. – V. 7. – № 1. – P. 121–142.

Поступила: 19.10.2022 г.

Прошла рецензирование: 24.11.2022 г.

#### Информация об авторах

**Давлетшин Ф.Ф.**, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

**Рамазанов А.Ш.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

**Акчури Р.З.**, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

**Шарафутдинов Р.Ф.**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

**Исламов Д.Ф.**, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

UDC 532.542

## INVESTIGATION OF THERMAL FIELD IN A WELL UNDER FLUID MOVEMENT UNDER INDUCTION IMPACT

Filyus F. Davletshin<sup>1</sup>,  
felix8047@mail.ru

Ayrat Sh. Ramazanov<sup>1</sup>,  
ramaz-1953@mail.ru

Ruslan Z. Akchurin<sup>1</sup>,  
ac4urin.ruslan@yandex.ru

Ramil F. Sharafutdinov<sup>1</sup>,  
gframail@inbox.ru

Denis F. Islamov<sup>1</sup>,  
islamovden@rambler.ru

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology,  
32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia.

**Relevance.** One of the promising methods of field geophysical studies of wells is active thermometry. The technology of conducting research by this method includes local induction heating of a metal casing, registration and analysis of changes in the temperature of the column. In case of poor-quality cementing of wells, a liquid flow may occur in the annular space between the casing and the cement ring (column overflow). Through the flow channel, water from unproductive reservoirs enters the well, which reduces the profitability of oil production. In this regard, timely detection and elimination of backwater flows is an important task of efficient well operation. During induction heating of the casing string in the liquid flow moving in the channel of the column overflow, due to heat exchange with the heated section of the column, a thermal disturbance occurs, which can be used to detect the presence of overflow.

**Object:** a production well in which studies are carried out by the method of active thermometry using local induction heating of the casing string.

**Purpose** of the research is to develop a mathematical model for calculating the thermal field caused by induction heating of a section of a metal casing string, taking into account liquid movement in the annular space between the casing string and the cement ring (column overflow); obtain analytical solutions for calculating the temperature of the casing string and liquid in the overflow channel; investigate the features of temperature field formation in the column and liquid in the overflow channel in induction heating, as well as the effect of fluid flow in the flow channel on the thermal field in the casing.

**Methods:** method of the integral Laplace transformation in time and the numerical algorithm of Stefest in order to obtain analytical solutions for calculating the temperature field; comparison of the results of calculations based on an analytical model with the results of numerical modeling in the Ansys Fluent software package (ANSYS Academic Research CFD license, agreement with Bashkir State University dated 06/15/2020).

**Results.** By the method of integral Laplace transformations, new analytical solutions were obtained for calculating the non-stationary temperature field in a well during induction heating of a section of a metal casing string, taking into account the fluid flow in the annular space between the column and the cement ring. The peculiarities of temperature field formation during heating and after switching off the inductor are investigated, it is shown that during 20 minutes of heating, temperature disturbances in the liquid moving in the overflow channel and the casing string propagate in the direction of flow at a distance of more than 2 m. It is shown that an increase in the column temperature at distances of about 1–2 m above the induction heating interval is associated with heat transfer from the heated fluid in the channel of the column flow. The criterion for increasing the temperature of the casing at distances of 1–2 m relative to the induction heating interval can be used as a sign of the column motion of the liquid. The influence of liquid velocity (flow rate) in the flow channel on column temperature formation nature during induction heating is investigated. It is shown that an increase in fluid flow in the overflow channel, other things being equal, leads to growth of temperature disturbance propagation rate in the casing body, as well as to a decrease in the heating value of the column due to an increase in the intensity of heat outflow from the inductor operation interval. The results of calculations based on the analytical model are compared with the results of modeling in the Ansys Fluent software package, it is found that the calculated temperatures of the column and liquid are somewhat overestimated compared to the numerical solution due to the use of simplifying assumptions within the analytical model.

**Key words:**

active thermometry, induction heating, non-stationary temperature field, Laplace transforms, Stefest algorithm, thermal mark, temperature perturbation.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic: «Creation of an intelligent integrated technology for the study and interpretation of data from field and geophysical studies of wells...», Agreement no. 075-11-2021-061 dated June 25, 2021.

## REFERENCES

1. Valiullin R.A., Yarullin R.K. Peculiarities of geophysical research in running horizontal wells. *Bulletin of the Academy of Sciences of Republic of Bashkortostan*, 2014, no. 2, pp. 21–28. In Rus.
2. Ipatov A.I., Kremenetsky M.I. Problems of field development control in the context of the «new economic policy». *Actual problems of oil and gas*, 2022, vol. 37, no. 2, pp. 87–99. In Rus.
3. Gayazov M.S., Valiullin R.A., Yarullin R.K. The method of regular temperature labels in measuring phase flow rates in low-flow horizontal wells. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2020, vol. 6, no. 1 (21), pp. 150–165. In Rus.
4. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.Sh., Dryagin V.V., Adiev Ya.R., Shilov A.A. *Sposob aktivnoy termometrii deystvuyushchikh skvazhin (varianty)* [Method of active temperature logging of operating wells (versions)]. Patent RF, no. 2194160, 2002.
5. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.Sh., Shilov A.A. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 157724*, SPE Heavy Oil Conference. Calgary, Alberta, Canada, 12–14 June 2012. pp. 1–7.
6. Kanafin I.V., Kosmylin D.V. Thermal field generation in wellbore analogue with local heating. *Proceedings of the Kabardino-Balkarian scientific center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 2, pp. 44–48. In Rus.
7. Turcotte D.L., Schubert G. *Geodynamics*. Cambridge, England, UK, Cambridge University Press, 2002. 187 p.
8. Bergman Th.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8<sup>th</sup> ed. St. Joseph County, Indiana, USA, University of Notre Dame, 2006. 1070 p.
9. Bryzgalov A.I., Vasilevskiy S.A., Kolesnikov A.F., Yakush S.E. Heat exchange of a cylindrical body with a catalytic surface when a subsonic nonequilibrium air plasma flows around. *Fluid Dynamics*, 2022, no. 5, pp. 94–112. In Rus.
10. Markov A.A. Gasdynamic and thermal effects of the synthesis of micron-sized particles by the carbon combustion method in straight-flow and three-zone reactors. *Fluid Dynamics*, 2022, no. 3, pp. 17–29. In Rus.
11. Hasan A.R., Kabir C.S. *Fluid flow and heat transfer in wellbores*. Richardson, Soc. Petrol. Eng., 2002. 175 p.
12. Akhmetova O.V., Filippov A.I., Shabarov A.B. The temperature field of the turbulent flow in the well, taking into account the dependence of the heat capacity on temperature. *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 588–595. In Rus.
13. Khabibullin I.L., Khisamov A.A. Non-stationary filtration in a formation with a hydraulic fracturing crack. *Fluid Dynamics*, 2019, no. 5, pp. 6–14. In Rus.
14. Carslaw G., Jaeger D. *Teplotovodnost tverdykh tel* [Thermal conductivity of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 488 p.
15. Poroshina N.I., Ryabov V.M. Methods for Laplace transform inversion. *Vestnik of the St. Petersburg University: Mathematics*, 2011, vol. 44, no. 3, pp. 55–64. In Rus.
16. McEligot D.M., Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandtl-number gas mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, vol. 39, pp. 1287–1295.
17. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teplotopredacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 416 p.
18. *ANSYSRI Documentation, Fluent Theory Guide*. Southpointe, ANSYS Inc, 2022. 1036 p.
19. Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A., Ramazanov A.Sh., Fedotov V.Ya., Sadretdinov A.A., Zakirov M.F. Application of active temperature logging at oilfields of Russia. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 161982*, SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. Moscow, Russia, 16–18 October 2012. pp. 1–10.
20. Asadzadeh M.Z., Raninger P., Prevedel P., Ecker W., Mücke M. Inverse model for the control of induction heat treatments. *Materials*, 2019, no. 12, pp. 1–15.
21. Pu C., Pei R., Huang H., Feng J., Su G.H. Mathematical and computer simulation technology of condensate oil and gas wells stimulated by electromagnetic heating. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, vol. 19, no. 3, pp. 292–302.
22. Song K., Guan J., Liu J., Li K. Experimental and numerical study of the effect of coil structure on induction nitriding temperature field. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 12, no. 7, pp. 1–14.
23. Xiong Z., Wei W., Zhou Y., Wang Y., Liao Y. Optimal control for a phase field model of melting arising from inductive heating. *AIMS Mathematics*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 121–142.

Received: 19 October 2022.

Reviewed: 24 November 2022.

## Information about the authors

**Filyus F. Davletshin**, Cand. Sc., assistant, Ufa University of Science and Technology.

**Ayrat Sh. Ramazanov**, Dr. Sc., professor, Ufa University of Science and Technology.

**Ruslan Z. Akchurin**, senior lecturer, Ufa University of Science and Technology.

**Ramil F. Sharafutdinov**, Dr. Sc., professor, Ufa University of Science and Technology.

**Denis F. Islamov**, Cand. Sc., senior lecturer, Ufa University of Science and Technology.

УДК 622.276.66

## ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА АЛЮМОСИЛИКАТНЫМИ ПРОПАНТАМИ, ИЗГОТОВЛЕННЫМИ НА ОСНОВЕ БУРОВЫХ ШЛАМОВ

Третьяк Александр Александрович<sup>1</sup>,  
aleksandr\_bngs@mail.ru

Яценко Елена Альфредовна<sup>1</sup>,  
tksiww@yandex.ru

Доронин Сергей Владимирович<sup>2</sup>,  
doronin@rusgazburenje.ru

Борисов Константин Андреевич<sup>1</sup>,  
13020165@mail.ru

Кузнецова Алла Витальевна<sup>1</sup>,  
alvitkuz@yandex.ru

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

<sup>2</sup> ООО «РусГазБурение»,  
Россия, 117420, г. Москва, ул. Намёткина, 12а.

**Актуальность** исследования обусловлена вопросами повышения экологической безопасности при проведении буровых работ и поиском возможных путей снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду. Одной из причин загрязнения окружающей среды является буровой шлам, представляющий собой смесь выбуренных горных пород и буровых растворов различной степени опасности. Утилизация бурового шлама – сложный и дорогостоящий процесс. Одним из возможных способов переработки бурового шлама является изготовление пропанта с целью последующей закачки его в продуктивный пласт при проведении гидравлического разрыва пласта. Учитывая тенденцию к увеличению доли месторождений с трудноизвлекаемыми запасами в активах нефтегазовых компаний, данное решение является актуальным.

**Целью** проведенного компьютерного моделирования являлось изучение возможности проведения гидравлического разрыва пласта с закачкой алюмосиликатного пропанта, изготовленного из бурового шлама.

**Объект:** изготовленный на основе бурового шлама алюмосиликатный пропант и продуктивный пласт-коллектор.

**Методы.** Выполнены исследования по прогнозному моделированию гидравлического разрыва пласта с закачкой алюмосиликатного пропанта, изготовленного на основе буровых шламов, с применением программного комплекса симулятора гидравлического разрыва пласта «РН-ГРИД».

**Результаты.** Рассмотренные задачи по прогнозному моделированию гидравлического разрыва пласта с применением алюмосиликатного пропанта, изготовленного на основе буровых шламов, открывают перспективу решения экологических проблем утилизации опасных отходов, образующихся при буровых работах. Анализ характеристик, полученных пропантов и выполненное компьютерное моделирование подтверждают возможность применения данного способа утилизации буровых шламов при использовании на нефтегазовых месторождениях Южного федерального округа.

### Ключевые слова:

гидравлический разрыв пласта, концентрация пропанта, буровой шлам, моделирование гидравлического разрыва пласта, округлость частиц, сферичность частиц.

### Введение

В настоящее время вектор развития нефтедобывающей промышленности смещается в направлении интенсификации добычи трудноизвлекаемых запасов (ТриЗ). На данный момент уже порядка 70 % месторождений можно отнести к данной категории, в связи с чем среди широкого спектра методов интенсификации добычи особое место заняла группа методов гидравлического разрыва пласта (ГРП), ведущая позиция которых обусловлена комплексным увеличением как текущего дебита скважин, так и коэффициента извлечения нефти (КИН) [1–6]. На сегодняшний день ГРП является одним из наиболее распространенных методов увеличения нефтеотдачи пластов. При проведе-

нии пропантного ГРП неотъемлемым элементом являются гранулы пропанта, предназначенные для предотвращения смыкания трещин и сохранения проницаемости трещин после снижения давления [7, 8].

Образующийся только на территории Южного федерального округа в процессе сооружения скважин буровой шлам, достигающий отметки порядка 2500 тыс. т, оказывает негативное влияние на окружающую среду, и его использование путем переработки в алюмосиликатный пропант для последующей интенсификации добычи является приоритетной задачей.

Разработка комплексного подхода к решению экологической и технической задачи включает в себя такие стадии, как: анализ геологических условий месторождения, подбор оптимальной сырьевой смеси

для синтеза пропанта, разработка технологии его изготовления и моделирование процесса ГРП с использованием разработанного пропанта в конкретных горно-геологических условиях.

Для получения высоких технико-экономических показателей необходимо осуществлять контроль параметров ГРП и производить предварительное моделирование движения вязких жидкостей с различными концентрациями пропанта как в призабойной зоне, так и в пласте-коллекторе [9–12].

#### Постановка задачи

В статье рассматривается возможность проведения ГРП на основании результатов моделирования данного процесса на одном из месторождений Южного федерального округа с применением алюмосиликатных пропантов, изготовленных на основе буровых шламов.

Прежде всего, стоит учитывать, что моделирование ГРП будет производиться на том же участке, где ранее был произведен отбор образцов бурового шлама [13]. Основными минералами, представляющими разрез скважин, являются глинистые породы: монтмориллонит, каолин, а также терригенный кварц, в меньшей степени полевой шпат. В ходе исследований буровых шламов был определен их химический состав ( $\text{SiO}_2$  – 62,14 и 35,14 мас. % и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 10,26 и 11,01 мас. % соответственно). Лабораторно подтверждена возможность использования шлама в синтезе алюмосиликатных пропантов. В шламах в достаточном количестве присутствуют следующие фазы:  $\alpha$ -кварц, монтмориллонит и алюмосиликаты, которые являются необходимыми в получении силикатных материалов [14].

При проведении лабораторных исследований определен оптимальный состав сырьевой смеси для синтеза пропантов, мас. %: буровой шлам – 80; стеклобой БТ-1 – 20, порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (сверх 100 мас. %) – 5 и порошок NaF (сверх 100 мас. %) – 4. Параметры изготавливаемых в лабораторных условиях пропантов приведены в табл. 1 [15].

**Таблица 1.** Основные параметры изготовленных алюмосиликатных пропантов

**Table 1.** Main parameters of manufactured aluminosilicate propanants

Сферичность/округлость Sphericity/roundness	Размеры гранул, мм Dimensions of granules, mm	Средний размер гранул, мм Average granule size, mm	Насынная плотность, кг/м <sup>3</sup> Bulk density, kg/m <sup>3</sup>	Пористость, % Porosity, %
0,8/0,9	0,6–1,1	0,85 мм	~1450	~ 34

Для проведения моделирования процесса ГРП были подобраны образцы пропантов с пределом прочности на сжатие, соответствующие требованиям ГОСТ Р 51761-2013 «Пропанты алюмосиликатные. Технические условия». Основные образцы приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Физические характеристики образцов алюмосиликатных пропантов

**Table 2.** Physical characteristics of samples of aluminosilicate propanants

№ состава Composition number	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Коэффициент спекания Sintering ratio	Прочность, МПа (psi) Strength, MPa (psi)
1	1799,82	1,07	56,11(8138,07)
2	1840,49	1,08	67,57 (9800,19)
3	1848,08	1,07	73,58 (10671,88)
4	1406,48	0,98	46,57(6754,41)

Для дальнейшего моделирования ГРП использовался пропант с размером фракции 16/30 и пределом прочности на сжатие 73,58 МПа. В результате исследований можно сделать предположение, что алюмосиликатный пропант, полученный из бурового шлама, соответствует требованиям ГОСТ и может быть использован при первичном моделировании ГРП на месторождениях Южного Федерального округа.

#### Материалы и методы моделирования

Основываясь на информации о ранее проведенных ГРП в данном районе, нами были подобраны наиболее оптимальные технические и технологические параметры с учетом особенностей применяемого пропанта.

В качестве программной среды для моделирования был применен симулятор ГРП «РН-ГРИД», к достоинствам которого можно отнести адекватное описание большинства физических явлений, таких как процессы переноса пропанта вдоль трещины, учитывающие при этом оседание пропанта, учет ускорений и торможений пропанта в потоке жидкости, а также бриджинг пропанта в узких местах трещины и повторную мобилизацию пропанта при последующем увеличении раскрытия [16–18].

При проведении исследований была подобрана типовая скважина со следующими основными характеристиками, представленными в табл. 3.

**Таблица 3.** Технические характеристики скважины

**Table 3.** Technical characteristics of the well

Глубина спуска эксплуатационной колонны, м Descent depth production casing, m	НКТ, глубина спуска, м Descent depth production tubing, m	Интервалы перфорации, м Perforation range, m	Зенитный угол на забое, градус Zenith angle at the bottom, degree	Азимутальный угол на забое, градус Azimuth angle at bottomhole, degree	Общая продуктивная мощность, м Total productive capacity, m	Пластовое давление, атм Reservoir pressure, atm
1397–1837	1380–1457	1662,6–1665,2 1669,9–1671,1 1674,8–1676,7 1680,5–1680,9 1682,2–1704,6	49,5	170	42	185

**Таблица 4.** Характеристики продуктивного горизонта  
**Table 4.** Characteristics of the productive horizon

Продуктивный горизонт Productive horizon	Кумская свита Kuma formation	
	Ед. изм Units	Значение Value
Эффективная проницаемость Effective permeability	мД/мD	0,22
Пористость/Porosity	%	26
Модуль Юнга на песчанике Young's modulus on sandstone	ГПа/GPa	19
Модуль Юнга на алевролите Young's modulus on siltstone		29
Коэффициент Пуассона на песчанике Poisson's ratio on sandstone	–	0,18
Коэффициент Пуассона на алевролите Poisson's ratio on siltstone		0,25
Коэффициент фильтрации на песчанике Sandstone filtration coefficient	(м/с <sup>0,5</sup> ) (m/s <sup>0,5</sup> )	0,000201
Коэффициент фильтрации на алевролите Siltstone filtration coefficient		0,00074–0,00014
Эффективная мощность (нефте/водо насыщенная) Effective height (oil/water saturated)	м/m	25,4
Общая мощность/General height		40,7
Вязкость нефти/Oil viscosity	сП/сP	1,5
Плотность нефти/Oil density	г/см <sup>3</sup> /g/cm <sup>3</sup>	0,85
Давление насыщения Saturation pressure	атм/atm	119,4
Газовый фактор/GOR		270,0
Объемный коэффициент Volume ratio	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1,21
Общая сжимаемость General compressibility	1/атм/1/atm	0,0003
Пластовая температура Reservoir temperature	град C/deg C	60
Интервал перфорации Perforation range	м/m	1662–1704

В геологическом плане рассматриваемая площадь представлена сложно построенной антиклинальной структурой. Месторождение имеет семь продуктивных горизонтов, основным из которых является горизонт кумской свиты, залегающий в интервале от 580 до 2500 м. Его общая мощность может достигать 90 м, а эффективная – 35 м. В стратиграфическом плане

кумская свита представлена зеленовато-серыми и тёмно-серыми глинами, известковистыми, алевроитовыми, слюдистыми, переходящими в мергели, с присыпками алевроита и тонкими прослоями песчаников (не превышают 1 см). Характеристика продуктивного горизонта приведена в табл. 4.

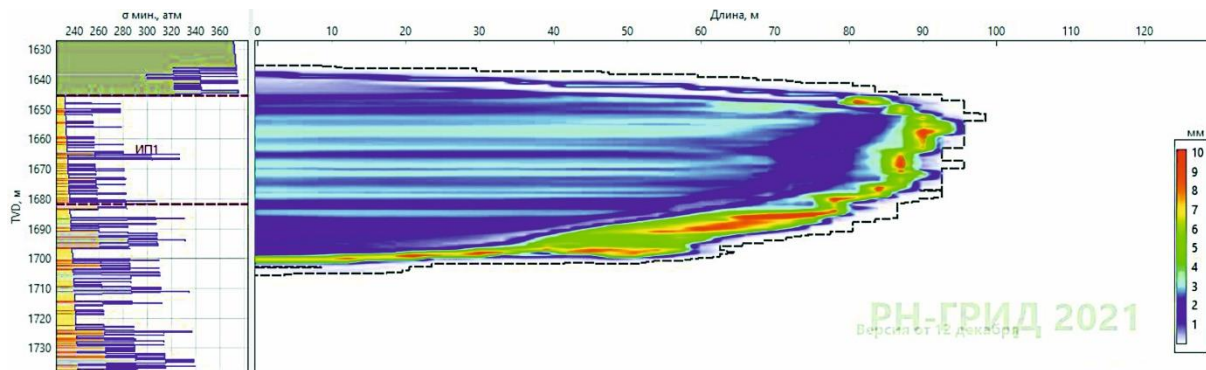
В ходе работ по моделированию было проведено большое количество экспериментов с целью выявления наиболее оптимальных параметров ГРП, были разработаны различные сценарии, включающие варьирование планов обработки, в части расхода закачиваемой жидкости, массы пропанта, вязкости жидкости, а также концентраций пропанта. Основные параметры приведены в табл. 5.

**Таблица 5.** Диапазоны параметров закачиваемой жидкости и пропанта

**Table 5.** Injected liquid and proppant parameters ranges

Параметр Parameter	Ед. изм Units	Вариативные значения Variable values	
		от/from	до/to
Масса пропанта Proppant weight	т/t	40	55
Концентрация пропанта Proppant concentration	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	300, 500, 700	
Расход жидкости Fluid flow	м <sup>3</sup> /мин m <sup>3</sup> /min	4	5
Фракция пропанта Proppant fraction	–	16/30	
Объем закачанной жидкости Injected liquid volume	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	200	300
Объем закачанной смеси Injected mixture volume		280	320
Объем пропантной подушки Cushion proppant volume		85	95

Исходя из базовых вариативных значений технологических параметров, а также характеристик продуктивного горизонта, были отобраны несколько моделей с максимальными концентрациями пропанта 300, 500 и 700 кг/м<sup>3</sup>, а также размерностью пропанта 16/30, как наиболее удачные и эффективные. Профили трещин с закрепленным раскрытием для данных моделей ГРП представлены на рис. 1–3.



**Рис. 1.** Профиль трещины с закрепленным раскрытием при концентрации пропанта 300 кг/м<sup>3</sup>  
**Fig. 1.** Fracture profile with a fixed opening at proppant concentration of 300 kg/m<sup>3</sup>

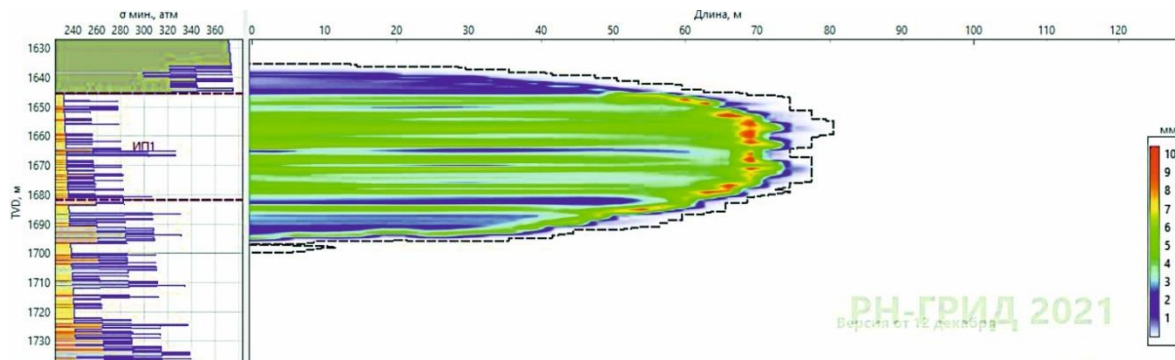


Рис. 2. Профиль трещины с закрепленным раскрытием при концентрации пропанта  $500 \text{ кг/м}^3$

Fig. 2. Fracture profile with a fixed opening at proppant concentration of  $500 \text{ kg/m}^3$

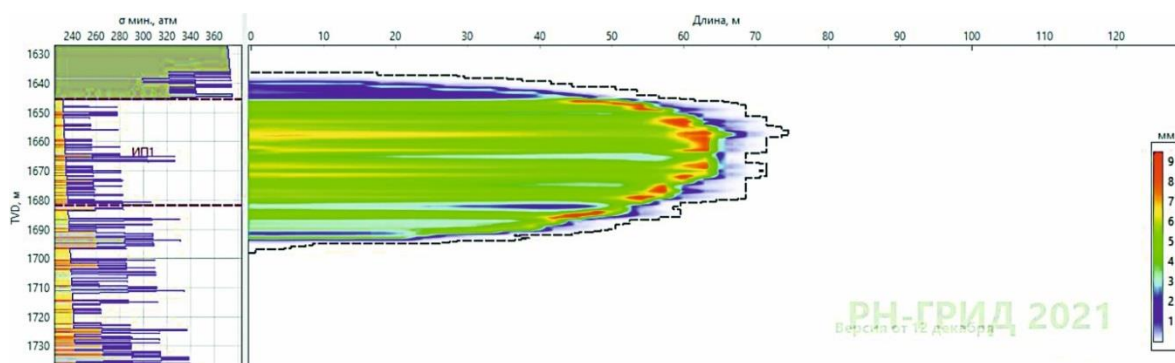


Рис. 3. Профиль трещины с закрепленным раскрытием при концентрации пропанта  $700 \text{ кг/м}^3$

Fig. 3. Fracture profile with a fixed opening at proppant concentration of  $700 \text{ kg/m}^3$

Таблица 6. Результаты моделирования ГРП

Table 6. Fracturing modeling results

Параметр Parameter	Ед. изм Units	Значение Value
Параметры трещины/Fracture characteristic		
Гидравлическая ширина (максимальная) Hydraulic width (maximum)	мм/mm	21,96
Гидравлическая ширина (средняя) Hydraulic width (medium)		11,26
Средняя концентрация пропанта Average proppant concentration	кг/м <sup>3</sup> /kg/m <sup>3</sup>	6,952
Средняя проводимость Average conductivity	мД*м/мД*m	2049,495
Средняя проницаемость Average permeability	мД/мД	5,444E+05
Эффективная проводимость Effective conductivity	мД*м/мД*m	1078,269
Эффективная проницаемость Effective permeability	мД/мД	3,232E+05
Безразмерная проводимость Dimensionless conductivity	–	16,14
Параметры давления/Pressure characteristic		
Максимальное давление на устье Maximum wellhead pressure	атм/atm	243,38
Чистое давление (в момент остановки) Net pressure (when stopped)		70,284
Градиент давления смыкания Closing pressure gradient	атм/м/atm/m	0,142
Сводные данные по обработке/Summary of processing data		
Объем закачанной жидкости Injected liquid volume	м <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	283,3
Объем закачано смеси Injected mixture volume		301,9
Объем пропантной подушки Cushion proppant volume		90
Процент пропантной подушки Cushion proppant percentage		%

По результатам проведенного моделирования наиболее оптимальной признана модель ГРП с максимальной концентрацией пропанта  $700 \text{ кг/м}^3$ , т. к. при данной концентрации эффективная и безразмерная проводимости трещины значительно больше, чем в остальных моделях. Это объясняется тем, что геометрия трещины при меньших концентрациях получается более «размазанной», что подтверждается закачкой жидкости в значительно большем объеме при одинаковой массе применяемого пропанта, и, соответственно, такие модели менее эффективны для дальнейшего дебита. При отсутствии дополнительных рисков (трение, извилистость и прочее) [19] большую эффективность показывает модель с концентрацией пропанта  $700 \text{ кг/м}^3$ . Основные результаты моделирования ГРП приведены в табл. 6.

При переходе от моделирования к проведению реального процесса ГРП с наличием большого числа геомеханических параметров с высокой степенью неопределенности стоит отметить отсутствие готовых типовых решений для изготовления пропанта из шлама и его дальнейшего применения. Каждая скважина по-своему уникальна, и все технологические операции должны быть доработаны с учетом возможных рисков, способных оказать негативное влияние на общий процесс увеличения дебита скважины [20].

#### Заключение

В виду особенностей курса развития нефтедобывающей промышленности, в частности, повышения эффективности разработки месторождений с трудно



извлекаемыми запасами углеводородов, а также снижения экологической нагрузки, за счет переработки отходов бурения, в частности бурового шлама, выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Техногенные отходы, образующиеся при сооружении скважин, являются ценным сырьем при вторичной их переработке в новые материалы и изделия, в частности пропанты, изготовленные из бурового шлама, и полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51761-2013 «Пропанты алюмосиликатные. Технические условия», с учетом дополнительной обработки.
2. По результатам моделирования процесса ГРП в условиях типового нефтегазового месторождения Южного Федерального округа возможно применение пропантов, изготовленных из бурового шлама, которые продемонстрировали наилучшие показате-

тели на модельной скважине при максимальной концентрации в  $700 \text{ кг/м}^3$  и общей массе 50 т.

3. При переходе к промышленной переработке буровых шламов в алюмосиликатные пропанты открывается широкая перспектива разработки месторождений углеводородов, представленных сложными, слабопроницаемыми коллекторами, с применением гидравлического разрыва пласта, не усугубляющая экологическую обстановку в районе проведения работ.

*Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках Соглашения № 20-79-10142 «Разработка эффективной технологии синтеза алюмосиликатных пропантов с использованием отходов бурения нефтегазовых скважин Южного федерального округа» (руководитель Александр Александрович Третьяк).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Criteria for selecting a candidate well for hydraulic fracturing / F.R. Heydarabadi, J. Moghadasi, Gh. Safian, R. Ashena // Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – Tinapa, Calabar, Nigeria, July 2010. DOI: 10.2118/136988-MS
2. Семкина А.А., Епифанов Ю.Г., Романько В.В. Обзор методов воздействия в карбонатных коллекторах // Журнал передовых исследований в области естествознания. – 2022. – № 16. – С. 92–95. DOI: 10.26160/2572-4347-2022-16-92-95
3. Опыт разработки низкопроницаемых коллекторов тюменской свиты Краснотинского месторождения в АО «РН-Няганьнефтегаз» / Ю.А. Плиткина, Д.П. Патраков, А.С. Глебов, И.А. Лиходед, Д.В. Емельянов // Нефтяная провинция. – 2019. – № 2 (18). – С. 72–100. DOI: 10.25689/NP.2019.2.72-100
4. Нуриев А.А. Некоторые аспекты проведения гидравлического разрыва пласта в нефтематеринских породах // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. – № 1. – С. 39–44. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-1-39-44
5. Савенок О.В., Иолчуев А.М. Увеличение КИН методом ГРП для довыработки запасов на Северо-Нефтяном месторождении // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2018. – № 2. – С. 142–159.
6. Исследование геомеханических свойств пород-коллекторов для уточнения дизайна гидроразрыва пласта / Э.Р. Агишев, Г.С. Дубинский, В.Ш. Мухаметшин, З.Н. Сагитова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2 (52). – С. 310–320. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-310-320
7. Experimental study of friction reducer flows in microfracture / S. Yongpeng, W. Qihua, W. Mingzhen, B. Baojun, M. Yinfa // Fuel. – 2014. – V. 131. – P. 28–35. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.04.050
8. Friction challenge in hydraulic fracturing / Y. Guo, M. Zhang, H. Yang, D. Wang, M. Ramos, T. Hu // Lubricants. – 2022. – V. 10. – № 2. – P. 14. DOI: 10.3390/lubricants10020014
9. A review of hydraulic fracturing simulation / B. Chen, B. Barboza, Y. Sun, J. Bai, T. Hywel, M. Dutko, M. Cottrell, C. Li // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2022. – V. 29. – P. 1–58. DOI: 10.1007/s11831-021-09653-z
10. The use of hydraulic fracturing in stimulation of the oil and gas wells in Romania / I. Pana, I.V. Ghetiu, I.G. Stan, F. Dinu, G. Branou, S. Suditu // Sustainability. – 2022. – V. 14. – № 9:5614. – P. 33. DOI: 10.3390/su14095614
11. Khodaverdian M., McElfresh P. Hydraulic fracturing stimulation in poorly consolidated sand: mechanisms and consequences // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Dallas, Texas, October 2000. SPE-63233-MS. DOI: 10.2118/63233-MS.
12. Md Yusof M.A., Mahadzir N.A. Development of mathematical model for hydraulic fracturing design // J Petrol Explor Prod Technol. – 2015. – V. 5. – P. 269–276. DOI: 10.1007/s13202-014-0124-z
13. Технология очистки и рециклинга бурового раствора / А.А. Третьяк, Е.А. Яценко, К.А. Борисов, Е.В. Карельская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 62–70. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3560
14. Идентификация отходов бурения и их использование / А.А. Третьяк, Е.А. Яценко, С.А. Онофриенко, Е.В. Карельская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332/ – № 2. – С. 36–43. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3041
15. Чумаков А.А., Яценко Е.А., Третьяк А.А. Влияние фторида натрия и оксида алюминия на прочностные характеристики алюмосиликатных пропантов, полученных на основе бурового шлама // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2022. – № 2. – С. 40–46. DOI: 10.17213/1560-3644-2022-2-40-46
16. Валидация модели трещины гидроразрыва Planar3D, реализованной в корпоративном симуляторе «РН-ГРИД» / А.В. Пестриков, А.Б. Пещеренко, М.С. Гребельник, И.М. Ямилов // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 46–50. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-11-46-50
17. Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта «РН-ГРИД»: от программной реализации к промышленному внедрению / А.А. Ахтямов, Г.А. Макеев, К.Н. Байдюков и др. // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 5. – С. 94–97. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-5-94-97
18. Егоров А.А. Отечественный флагманский продукт «Роснефть» – «РН-ГРИД» симулятор моделирования гидроразрыва пласта (ГРП) // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. – 2021. – № 2 (44). – С. 12–27.
19. Елисеев П.И. Сопоставление результатов моделирования в симуляторе «РН-ГРИД» с промысловыми исследованиями гравитационной дифференциации пропанта в процессе смыкания трещины гидроразрыва в низкопроницаемом коллекторе // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 12. – С. 117–121. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-12-117-121
20. Bennour Z., Mahmud W.M., Ermila M. Effect of multiple fracture initiation on the accuracy of hydraulic fracturing simulation // Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – V. 11: Petroleum Technology. – Virtual, Online, 2020, August 3–7. DOI: 10.1115/OMAE2020-18590

Поступила: 15.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 10.03.2023 г.

#### **Информация об авторах**

**Третьяк А.А.**, доктор технических наук, доцент, декан факультета геологии, горного и нефтегазового дела Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

**Яценко Е.А.**, доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой общей химии и технологии силикатов технологического факультета Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

**Доронин С.В.**, первый заместитель генерального директора ООО «РусГазБурение».

**Борисов К.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовой техники и технологий факультета геологии, горного и нефтегазового дела Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

**Кузнецова А.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники факультета информационных технологий и управления Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

UDC 622.276.66

## PREDICTIVE MODELING OF HYDRAULIC FRACTURING BY ALUMINOSILICATE PROPPANTS MADE BASED ON DRILL CUTTINGS

**Alexander A. Tretyak<sup>1</sup>,**  
aleksandr\_bngs@mail.ru

**Elena A. Yatsenko<sup>1</sup>,**  
tksiww@yandex.ru

**Sergey V. Doronin<sup>2</sup>,**  
doronin@rusgazburenje.ru

**Konstantin A. Borisov<sup>1</sup>,**  
13020165@mail.ru

**Alla V. Kuznetsova<sup>1</sup>,**  
alvitkuz@yandex.ru

<sup>1</sup> M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

<sup>2</sup> LLC «RusGazBurenje»,  
12a, Nametkin street, Moscow, 117420, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the issues of improving environmental safety during drilling and the search for possible ways to reduce the anthropogenic load on the environment. One of the causes of environmental pollution is drill cuttings, which is a mixture of drilled rocks and drilling fluids of varying degrees of danger. Disposal of drill cuttings is a complex and expensive process. One of the possible ways of processing drill cuttings is the production of propane for the purpose of its subsequent injection into the productive formation during hydraulic fracturing. Given the tendency to increase the share of fields with hard-to-recover reserves in the assets of oil and gas companies, this decision is relevant.

**The purpose** of the computer simulation was to study the possibility of hydraulic fracturing with injection of aluminosilicate proppant made from drill cuttings.

**The object:** aluminosilicate proppant made based on drill cuttings and a productive reservoir.

**Methods.** Studies were carried out on predictive modeling of hydraulic fracturing with injection of aluminosilicate proppant made based on drill cuttings using the software package of the hydraulic fracturing simulator «RN-GRID».

**Results.** The considered tasks of predictive modeling of hydraulic fracturing with the use of aluminosilicate proppant made based on drill cuttings opens up a broad perspective of solving environmental of hazardous waste generated during drilling operations. The analysis of the characteristics of the obtained proppant and the computer modeling performed confirm the possibility of using this method of disposal of drill cuttings when used in the oil and gas fields of the Southern Federal District

### Key words:

Hydraulic fracturing, proppant concentration, drill cuttings, modeling of hydraulic fracturing, roundness of particles, sphericity of particles.

The research was carried out at the FSEI HE «M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI)» and financially supported by the Russian Science Foundation within the agreement no. 20-79-10142 «Development of the effective technology of the synthesis of aluminosilicate proppants using the oil and gas well drilling wastes in Southern Federal District» (project leader Aleksandr A. Tretyak).

### REFERENCES

- Heydarabadi F.R., Moghadasi J., Safian Gh., Ashena R. Criteria for selecting a candidate well for hydraulic fracturing. *Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Tinapa, Calabar, Nigeria, July 2010. Available at: <https://doi.org/10.2118/136988-MS> (accessed 1 February 2023).
- Semakina A.A., Epifanov Yu.G., Romanko V.V. Overview of methods impacts in carbonate reservoirs. *Journal of advanced research in natural science*, 2022, no. 16, pp. 92–95. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.26160/2572-4347-2022-16-92-95> (accessed 1 February 2023).
- Plitkina Yu.A., Patrakov D.P., Glebov A.S., Likhoded I.A., Emel'yanov D.V. Development experience of low permeable reservoirs of Tyumen suite of krasnoleninskoye field RN-Nyaganneftegas JSC. *Neftyanaya Provintsiya*, 2019, no. 2 (18), pp. 72–100. In Rus. DOI: 10.25689/NP.2019.2.72-100.
- Nuriev A.A. On the aspects of hydraulic fracturing in source rock. *Petroleum Engineering*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 39–44. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-1-39-44> (accessed 1 February 2023).
- Savenok O.V., Iolchuev A.M. The increase in the oil recovery factor by the hydraulic fracturing method for additional development of reserves on the Severo-Neftyanoye field. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*, 2018, no. 2, pp. 142–159. In Rus.
- Agishev E.R., Dubinsky G.S., Mukhametshin V.Sh., Sagitova Z.N. Study of reservoir rocks geomechanical properties for the hydraulic fracturing design. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 310–320. In Rus. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-310-320.
- Yongpeng S., Qihua W., Mingzhen W., Baojun B., Yinfa M. Experimental study of friction reducer flows in microfracture. *Fuel*, 2014, vol. 131, pp. 28–35. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.04.050.

8. Guo Y., Zhang M., Yang H., Wang D., Ramos M., Hu T. Friction challenge in hydraulic fracturing. *Lubricants*, 2022, vol. 10, no. 2, pp. 14. DOI: 10.3390/lubricants10020014.
9. Chen B., Barboza B., Sun Y., Bai J., Thomas H., Dutko M., Cottrell M., Li C. A Review of Hydraulic Fracturing Simulation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, vol. 29, pp. 1–58. DOI: 10.1007/s11831-021-09653-z.
10. Pana I., Ghetiu I.V., Stan I.G., Dinu F., Branoiu G., Suditu S. The use of hydraulic fracturing in stimulation of the oil and gas wells in Romania. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 9:5614, pp. 33. DOI: 10.3390/su14095614.
11. Khodaverdian M., McElfresh P. Hydraulic fracturing stimulation in poorly consolidated sand: mechanisms and consequences. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, Texas, October 2000. SPE–63233–MS. DOI: 10.2118/63233-MS.
12. Md Yusof M.A., Mahadzir N.A. Development of mathematical model for hydraulic fracturing design. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2015, no. 5, pp. 269–276. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13202-014-0124-z> (accessed 1 February 2023).
13. Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Borisov K.A., Karelskaya E.V. Drilling mud cleaning and recycling technology. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 62–70. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3560.
14. Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Onofrienko S.A., Karelskaya E.V. Identification of drilling wastes and their use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 36–43. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3041
15. Chumakov A.A., Yatsenko E.A., Tretyak A.A. Influence of sodium fluoride and aluminum oxide on the strength characteristics of aluminosilicate proppants obtained on the basis of drill cuttings. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*, 2022; no. 2 (214), pp. 40–46. In Rus. DOI: 10.17213/1560-3644-2022-2-40-46
16. Pestrikov A.V., Peshcherenko A.B., Grebelnik M.S., Yamilev I.M. Validation of the Planar3D hydraulic fracture model implemented in the corporate simulator RN-GRID. *Oil Industry Journal*, 2018, no. 11, pp. 46–50. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-11-46-50.
17. Akhtyamov A.V., Makeev G.A., Baydyukov K.N., Muslimov U.S., Matveev S.N., Pestrikov A.V., Rezaev S.N. Corporate fracturing simulator RN-GRID: from software development to in-field implementation. *Oil Industry Journal*, 2018, no. 5, pp. 94–97. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-5-94-97
18. Egorov A.A. Domestic flagship product «ROSNEFT» – «RN-GRID» simulator simulation of hydraulic facing (HF). *Avtomatizatsia i IT v neftegazovoy oblasti*, 2021, no. 2 (44), pp. 12–27. In Rus.
19. Eliseev P.I. Comparing simulation results in the RN-GRID software with field research of proppant gravity differentiation in the process of closing a hydraulic fracture in a low-permeability reservoir. *Oil Industry Journal*, 2021, no. 12, pp. 117–121. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-12-117-121
20. Bennour Z., Mahmud W.M., Ermila M. Effect of multiple fracture initiation on the accuracy of hydraulic fracturing simulation. *Proceedings of the ASME 2020 39<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Vol. 11: *Petroleum Technology*. Virtual, Online. August 3–7, 2020. Paper no. OMAE2020-18590, V011T11A014. ASME. P.7. DOI: 10.1115/OMAE2020-18590

Received: 15 February 2023.

Reviewed: 10 March 2023.

#### Information about the authors

**Alexander A. Tretyak**, Dr.Sc., associate professor, dean of the Faculty of geology, mining and petroleum engineering, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).

**Elena A. Yatsenko**, Dr. Sc., professor, head of the General chemistry and technology of silicates department, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).

**Sergey V. Doronin**, first deputy general director, LLC «RusGazBurenie».

**Konstantin A. Borisov**, Cand. Sc., associate professor, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

**Alla V. Kuznetsova**, Cand. Sc., associate professor, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

УДК 553.98:551.83:551.734.5

## ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАННЕФАМЕНСКИХ РИФОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ДЕНИСОВСКОГО ПРОГИБА ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Кривошеков Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
krivoshchekov@gmail.com

Боталов Андрей Николаевич<sup>1</sup>,  
botalov97@yandex.ru

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность.** В настоящее время ввиду роста трудноизвлекаемых ресурсов и запасов углеводородов более актуальным становится изучение карбонатных пород сложного строения, в частности задонско-елецких отложений верхнедевонско-турнейского нефтегазоносного комплекса Денисовского прогиба Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Как известно, девонский период в истории Тимано-Печорского бассейна имеет важное значение в связи с обширным развитием рифовых отложений, представляющих собой потенциальные зоны нефтегазонакопления. Изучение общих черт строения и анализ материалов по результатам макро- и микропетрографических исследований керн позволит реконструировать фациальную зональность и палеогеографические обстановки осадконакопления задонско-елецких рифогенных построек как перспективных объектов для поиска залежей нефти и газа.

**Цель:** изучить общие черты строения и литолого-петрографические особенности задонско-елецких рифогенных отложений Денисовского прогиба с целью реконструкции их фациальной зональности, обстановок и условий формирования.

**Объект:** задонско-елецкие рифогенные отложения фаменского яруса верхнего девона южной части Денисовского прогиба Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

**Методы:** литолого-фациальный анализ и палеогеографические реконструкции на основе анализа материалов, включающих комплекс геофизических исследований скважин, фотографии колонок и срезов керн, результаты изучения карбонатности пород, литолого-седиментологического описания керн, а также фотографии и микропетрографическое описание шлифов.

**Результаты.** Представлены результаты изучения раннефаменских рифогенных отложений, являющихся потенциальными зонами нефтегазонакопления на территории юга Денисовского прогиба Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Прослежена изменчивость пород по разрезу и площади изучаемого района, что позволило выделить четыре литотипа пород, которые объединяются в две группы. Изучен вещественный состав пород на основе анализа определенных карбонатности. Породы на 93–98 % сложены карбонатными минералами – кальцитом и доломитом. Макро- и микропетрографический анализ структурно-текстурных особенностей литотипов с использованием широко известной модели стандартных фациальных поясов, разработанной Дж. Уилсоном, позволил провести реконструирование фациальных обстановок осадконакопления раннефаменских отложений. Породы накапливались в трех фациальных зонах мелководно-шельфовой карбонатной платформы: передового склона, микробаиального холма и мелководья, что определило их сложное полифациальное строение.

### Ключевые слова:

Фаци, литолого-фациальная зональность, задонско-елецкие отложения, верхний девон, Денисовский прогиб, Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция

### Введение

В связи с увеличением доли трудноизвлекаемых ресурсов и запасов углеводородов все актуальнее становится вопрос изучения карбонатных пород-коллекторов, характеризующихся сложным строением порового пространства. В Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (НГП) одним из основных объектов добычи углеводородов является верхнедевонско-турнейский терригенно-карбонатный нефтегазоносный комплекс (НГК), значимые ресурсы и запасы в котором сосредоточены в рифогенных породах-коллекторах задонского и елецкого горизонтов раннефаменского возраста.

Значимый вклад в изучение строения и продуктивности задонского и елецкого горизонтов в составе верхнедевонско-турнейского НГК Тимано-Печорского региона внесли многие ученые: А.А. Алабушин, А.И. Антошкина, Н.В. Беляева, Б.П. Богданов, В.А. Дедеев, В.А. Жемчугова, В.В. Меннер, Н.И. Никонов, А.А. Отмас, Л.В. Пармузина, О.М. Прищепа и

др. Большой объем геолого-разведочных работ, выполненных научными и производственными организациями: ФГБУ «ВНИГНИ», АО «ВНИГРИ», ООО «ТП НИЦ», ИГКНЦ РАН, ИПНГ РАН, ФГБОУ ВО УГТУ, ОАО «Севергеофизика», ОАО «Нарьянмар-сейсмозащита», ПАО «ЛУКОЙЛ» и др. [1], в начале XXI в., позволил открыть достаточно крупные залежи нефти в рифогенных отложениях.

Существенный объем сейсмозаведочных и буровых работ, проведенных на юге Денисовского прогиба в 2000–2010-х гг. [2, 3], позволил выявить ряд продуктивных структур: Восточно-Ламбейшорскую, Баяндыскую, Северо-Ипатскую, Южно-Ипатскую и др., промышленные запасы и прогнозные ресурсы углеводородов которых связаны с органогенными постройками задонского и елецкого возраста и пластами их облекания. Данные продуктивные постройки по своему строению аналогичны верхнедевонским нефтеносным рифам Камского-Кинельского типа Волго-Уральской НГП. Как известно, крупные ресурсы и

запасы нефти в верхнедевонских рифах Камско-Кинельской системы прогибов установлены на территории Пермского края [4–6], Республик Башкирия [7–9] и Татарстан [10, 11], Оренбургской области [12–14] и др. Важным показателем является то, что верхнедевонские рифогенные постройки продуктивны в ряде некоторых крупных нефтегазоносных бассейнов (НГБ) мира. Так, в Северной Америке в Западно-Канадском НГБ [15–17] в средне-позднедевонских рифах, образующих серию органогенных построек, открыто около 350 нефтяных и газовых месторождений, суммарные запасы нефти которых оцениваются приблизительно в 800 млн т. Залежи сконцентрированы в трех основных ареалах рифовых зон нефтегазонакопления – Форт-Нельсон, Центральный и Юго-Восточный. Также промышленная нефтегазоносность верхнедевонских рифов доказана в крупном НГБ Кэннинг на северо-западе Австралийской платформы [18–20]. Помимо этого, рифогенные верхнедевонские отложения известны и в других частях света: в провинциях Юньнань, Гуйчжоу, Хунань и Гуанси Южного Китая [21, 22], в районе Рейнских Сланцевых гор и Гарце в Германии [23, 24], на северо-западе Африки (Марокко) [25, 26], в центральной части Ирира [27, 28], в России на Урале, в районе Салаир, Горного Алтая и в основании Западно-Сибирской эпигерцинской плиты [29]. Таким образом, позднедевонское рифообразование считается значимым периодом в истории позднего палеозоя и имеет широкую географию мирового уровня.

Как отмечает Л.В. Пармузина [30], важной особенностью рифогенных отложений изучаемого разреза Тимано-Печорской НГП является то, что они представляют собой нетипичные карбонатные массивы в связи с отсутствием в них организмов рифостроителей, которые способны формировать устойчивый каркас пород. Поэтому исследователи относят их к особым типам рифовых построек. Т.И. Кушнера интерпретирует данный тип отложений как рифы, В.Н. Тихий – как «иловые холмы» (агглютигермы), В.В. Меннер – как карбонатные банки, А.И. Антошкина – как микробийальные холмы [31].

Рифогенные отложения задонского и елецкого горизонтов Денисовского прогиба характеризуются значительной неоднородностью литологического состава и порового пространства по разрезу и площади [32]. Вскрытые скважинами разрезы, находящиеся друг от друга на незначительном расстоянии, могут иметь существенные различия, что связано с особенностями осадконакопления, в частности с фациальной зональностью, циклами седиментации и постседиментационными преобразованиями пород. Детальное исследование задонских и елецких отложений, фациальный анализ и палеогеографические реконструкции их осадконакопления представляют особую важность для установления условий формирования рифовых построек, являющихся перспективными для поиска углеводородов.

Цель данной работы – реконструкция фациальной зональности и палеогеографических обстановок осадконакопления задонских и елецких карбонатных отложений фаменского яруса верхнего девона на основе

изучения особенностей строения разреза и анализа результатов макро-, микропетрографических исследований керна Восточно-Ламбейшорского, Баяндынского и Южно-Ипатского месторождений. В тектоническом отношении район исследования приурочен к Лайскому валу и Лодминской перемычке южной части Денисовского прогиба (рис. 1), который представляет собой крупную отрицательную структуру размерами 350×80 км. Прогиб расположен между Печоро-Кожвинским и Колвинским мегавалами и наиболее выражен по верхнепалеозойским отложениям. В нефтегазогеологическом отношении район исследования относится к Лайско-Лодминскому нефтегазонасному району (НГР) Печоро-Колвинской нефтегазоносной области (НГО).

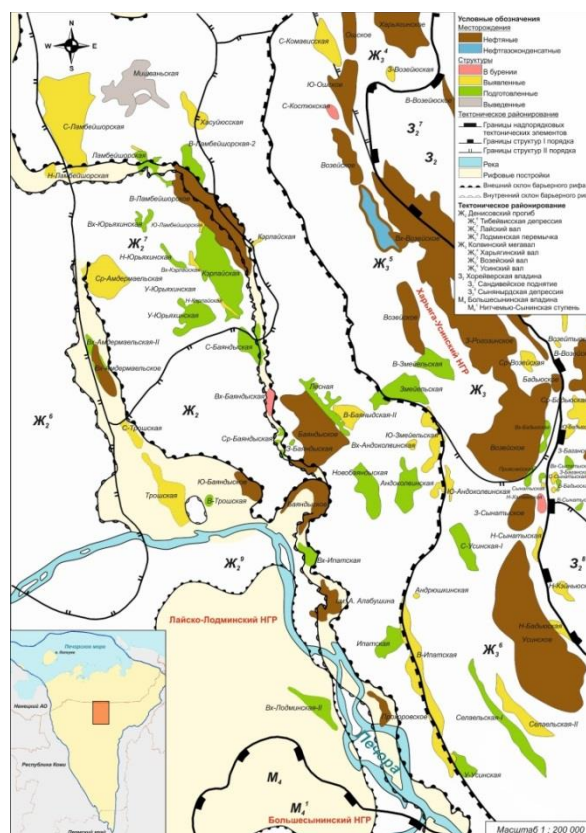


Рис. 1. Обзорная карта южной части Денисовского прогиба и прилегающих территорий (ЛУКОЙЛ-Инжиниринг, 2017 [33], с изменениями авторов)

Fig. 1. Overview map of the southern part of the Denisov depression and adjacent areas (LUKOIL-Engineering, 2017 [33], with modifications by the authors)

#### Общие черты строения раннефаменских отложений

На территории Денисовского прогиба разрез нижнефаменского яруса представлен в объеме задонского (D<sub>3zd</sub>) и елецкого (D<sub>3el</sub>) горизонтов, формировавшихся преимущественно в мелководной и умеренно глубоководной зонах шельфа, границей которых служили барьерные рифовые сооружения. На мелководном шельфе накапливались преимущественно глинисто-карбонатные, а на глубоководном – депрессионные кремнисто-карбонатно-глинистые осадки и толщи за-

полнения. В направлении палеосуши их сменяли фации приливно-отливных равнин со смешанным карбонатно-терригенным осадконакоплением.

Подшва задонско-елецкого комплекса осадков на территории Денисовского прогиба фиксируется по региональному предфранскому размыву, а кровля проводится по средней части глинистой пачки Rpel-up, нижняя часть которой относится к елецкому возрасту, а верхняя – к усть-печорскому среднего фамена. Общая мощность комплекса в районе Лайско-

Лодминского атолла составляет 513–547 м (скв. Верхнелодминская № 1, 2), увеличиваясь в южном и северном направлениях до 609–616 м на Зверинецкой площади (скв. Зверинецкая № 1 и Южно-Зверинецкая № 1), до 773–924 м – на Командищорской (скв. Командищорская № 51, 52), до 858–955 м – на Мишваньской (скв. Северо-Мишваньяская № 20 и Мишваньяская № 13) площадях соответственно. Пример строения разреза фаменского яруса юга Денисовского прогиба представлен на рис. 2.

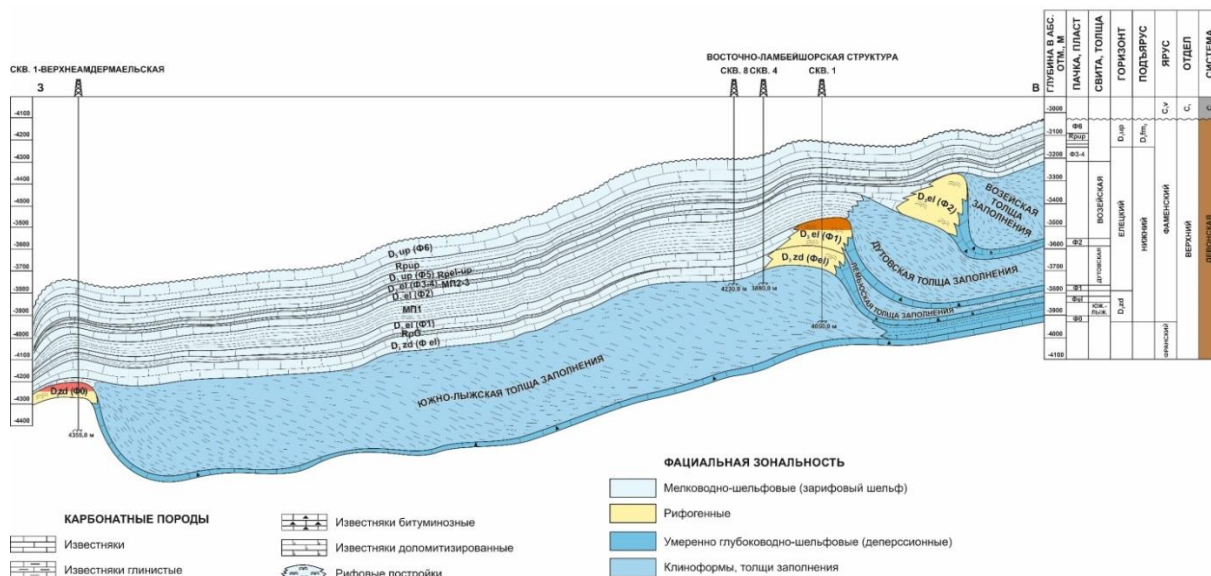


Рис. 2. Литолого-фациальный разрез фаменского яруса  
Fig. 2. Lithological and facies section of the Famennian stage

Толща раннефаменских осадков сложена различными литотипами и характеризуется циклическим строением [32, 33]. Разрез состоит из различных рангов от макроциклов до циклитов IV порядка (рис. 3). Задонский и елецкий горизонты в совокупности образуют единый макроцикл (II порядок) и входят в состав среднедевонско-турнейского мегацикла осадконакопления. В составе макроцикла выделяются волгоградско-задонский и елецкий мезоциклы (III порядок), каждый из которых, в свою очередь, подразделяются на более мелкие циклиты IV порядка – D<sub>3zd</sub> (Ф<sub>0</sub>, Ф<sub>el</sub>) и D<sub>3el</sub> (Ф<sub>1</sub>, Ф<sub>2</sub>, Ф<sub>3-4</sub>, нижняя часть Ф<sub>5</sub>) (рис. 3).

#### Материалы и методика исследования

Работа основана на комплексном анализе фактического материала по результатам исследования керна из разрезов задонских и елецких рифогенных отложений скважин Восточно-Ламбейшорская-65, Баяндская-27 и Южно-Ипатская-1, расположенных в южной части Денисовского прогиба. Для достижения поставленной цели были проанализированы следующие материалы: комплекс геофизических исследований скважин (ГИС), фотографии колонок и срезов керна в дневном и ультрафиолетовом свете, результаты изучения карбонатности пород, послышного литолого-седиментологического описания керна суммарной мощностью 126 м, а также фотографии и результаты микропетрографического описания 115 шлифов.

При литотипизации пород применялась широко известная классификация Р. Данхэма [34], основанная на структурных и генетических признаках карбонатных отложений. Для изучения вещественного состава литотипов были проанализированы данные по определению карбонатности пород.

Фациальные реконструкции проведены на основе модели стандартных фациальных поясов, разработанной известным зарубежным ученым в области изучения обстановок формирования карбонатных фаций Дж. Уилсоном [35].

При палеогеографических реконструкциях авторы руководствовались работами отечественных ученых-геологов: Н.И. Никонова, А.И. Антошкиной, Н.В. Беляевой, В.А. Жемчуговой, Л.В. Пармузиной.

#### Результаты литологической типизации пород и изучения вещественного состава

В результате выполнения работы по анализу материалов комплекса ГИС и литолого-седиментологических исследований керна и шлифов задонских и елецких рифогенных отложений была построена схема корреляции по линии скважин Восточно-Ламбейшорская-65, Баяндская-27 и Южно-Ипатская-1 (рис. 4), что позволило проследить изменчивость состава пород по разрезу и площади, а также провести их литологическую типизацию. В целом выделено четыре литотипа (ЛТ) пород, которые разделяются преимущественно на две группы.

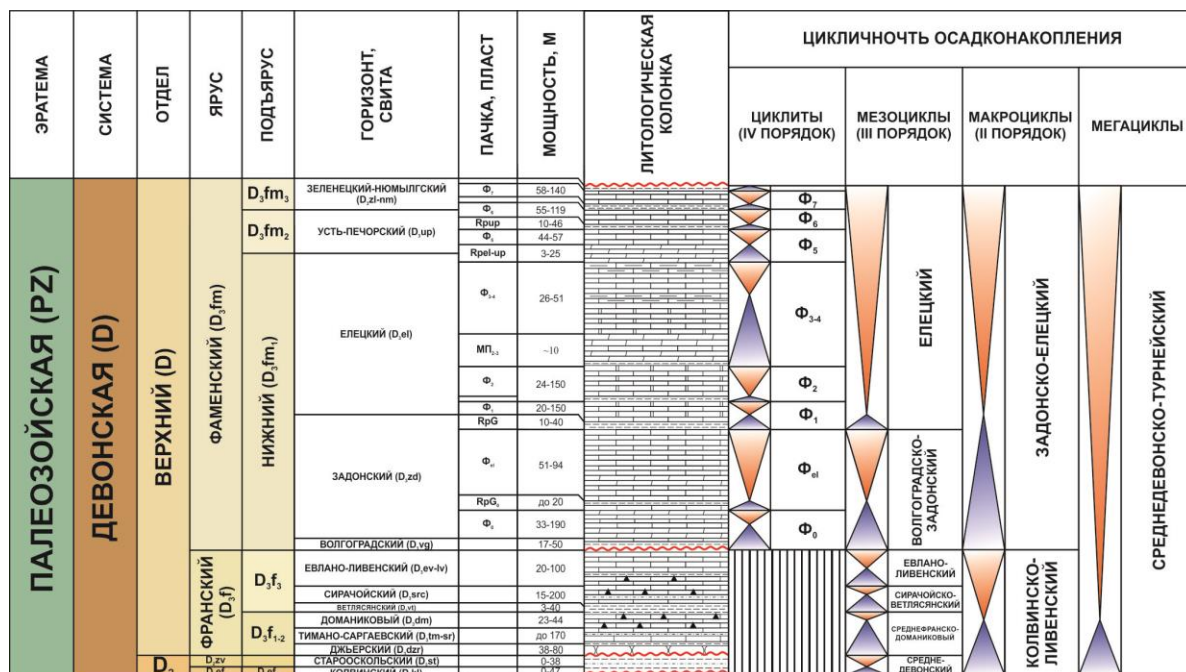


Рис. 3. Литолого-стратиграфическая схема и цикличность осадконакопления верхнедевонских отложений Денисовского прогиба

Fig. 3. Lithologic and stratigraphic scheme and cyclicity of sedimentation of Upper Devonian deposits of the Denisov depression

Первая группа – литотипы, у которых исходные компоненты в процессе осадконакопления были скреплены между собой (баундстоуны), а вторая группа – литотипы, у которых исходные компоненты не были скреплены между собой при осадконакоплении (рудстоуны, грейнстоуны, пакстоуны). Литологическая характеристика разновидностей пород представлена ниже. Примеры литотипов приведены в следующем разделе.

1. ЛТ 1 – Известняк пелоидный, интракластовый (рудстоун, пакстоун и грейнстоун). Породы коричневатого-серого, светло-серого и серого цвета. Текстура пород: стилолитовая, трещиноватая, кавернозно-пористая, пористая, пятнистая, линзовидно-пятнистая, обусловлена неравномерной перекристаллизацией, доломитизацией, пигментацией битумом, ориентированная, беспорядочная. Породы сложены пелоидами и интракластами. Локально наблюдаются водорослевые желваки (онколиты, онкоиды) концентрического строения уплощенной формы, образованные нитями синезеленых водорослей, которые наматывались на интракласты, пелоиды и биокласты. Встречается редкий детрит остракод, гастропод, водорослей и криноидей. Форменные элементы сцементированы яснокристаллическим тонко-мелкозернистым, тонкозернистым и разнозернистым кальцитом. Локально цементом служит микритовый кальцит. Тип цемента поровый, порово-базальный, базальный, участками инкрустационный. Вторичное минералообразование представлено процессами кальцитизации, доломитизации, слабо развитыми процессами пиритизации и окремнения. В породе развиты стилолиты, локально встречаются редкие

трещины. Породы данного литотипа пористые и кавернозно-пористые. Открытая пористость варьирует в пределах от 0 до 15 %. Пористость неравномерная.

- ЛТ 2 – Известняк оолитовый, пелоидно-оолитовый, оолитово-пелоидный, интракластово-оолитовый (грейнстоун). Породы коричневатого-серого цвета. Текстура пород слоистая, линзовидно-слоистая, неяснопятнисто-слоистая, пятнисто-слоистая, пористая. Микроскопически породы сложены оолитами и реже онкоидами. Кроме них среди форменных элементов встречаются интракласты, пелоиды и биокласты. Форменные элементы сцементированы яснокристаллическим кальцитом тонко-мелкозернистой и разнозернистой размерности. Тип цемента поровый и инкрустационный. Доломитизация не превышает 10 %. Породы данного литотипа плотные и крепкие, неравномерно пигментированы битумом. Единичные слабоволнистые трещины выполнены тонкозернистым спаритовым кальцитом.
- ЛТ 3 – Известняк микробийный, микробийно-детритовый (баундстоун). Породы от светло-серого до серо-коричневого цвета. Текстура пятнистая, слоисто-пятнистая, линзовидная, обусловлена неравномерной пигментацией битуминозно-органическим веществом (БОВ) и доломитизацией, стилолитовая, пористая, кавернозно-пористая, трещиноватая. Породы сложены густками и комочками микробийного происхождения. Породы крепкие, плотные. Основная масса породы комковатая. Порода стилолитизирована, доломитизирована, нефтенасыщена. Форменные элементы сцементированы новообразованным кальцитом



тонкозернистой, тонко-мелкозернистой, среднезернистой, мелко-тонкозернистой, мелкозернистой, разнотонкозернистой размерности. Тип цемента поровый, базально-поровый, крустификационный, спаритовый. На фоне основной микробияльной массы отмечаются гнезда (фенестральные полости или фенестры), заполненные новообразованным кальцитом. В микробияльных байндстоунах среди органических остатков преобладают кальцитовые сферы. В подчиненном количестве в породе фиксируются раковинки остракод, изредка отмечаются чехлы зеленых водорослей и редко фрагменты строматопороидей. Органические остатки неравномерно по интенсивности перекристаллизованы, участками выщелочены. Порода в разной степени доломитизирована, перекристаллизована, сульфатизирована и кальцитизирована. Наиболее ярко развиты процессы доломитизации. Порода доломитистые и доломитовые. Пиритизация и окремнение развиты незначительно. Порода стилолитизирована. Отмечаются редкие протяженные открытые трещины, секущие форменные элементы, вертикальные и наклонные минеральные и открытые трещинки. Пористость этого литотипа незначительная, в единичных случаях достигает 7 %.

4. ЛТ 4 – *Доломит вторичный* среднекрупнозернистый, крупно-среднезернистый, реже среднезернистый известковистый и известковый серого и коричневатого-серого цвета с редкими глинистыми слоями, сульфатизированный, участками пиритизированный, стилолитизированный, неравномерно пористо-кавернозный и кавернозно-пористый, трещиноватый, неравномерно пигментированный БОВ, со следами нефтенасыщения. Текстура пятнистая, обусловлена неравномерной пигментацией БОВ, сульфатизацией и пиритизацией породы, слоистая, трещиноватая, пористо-кавернозная, кавернозно-пористая, пористая, стилолитовая. Порода сложена зернами доломита (от 66 до 97 %) изометричной, многогранной, неправильно-ромбоэдрической и ромбоэдрической формы. Упаковка зерен преимущественно плотная, участками рыхлая. Эпизодически наблюдаются реликты первичной породы (0–15 %) – микробияльно-детритового известняка, представленные пелитоморфными кальцитовыми сгустками и комочками с обилием кальцисфер.

Анализ определений карбонатности задонско-елецких отложений позволил определить вещественный состав выделенных литотипов. На круговых диаграммах (рис. 5) продемонстрированы результаты средних содержаний карбонатных минералов (кальцита и доломита) и нерастворимого остатка (НО) в литотипах.

На основе полученных соотношений представлены следующие выводы:

- известняк пелоидный, интракластовый (ЛТ 1) и известняк микробияльный, микробияльно-детритовый (ЛТ 3) имеют практически идентичный вещественный состав и сложены преимущественно кальцитом (89–91 %), на доломит приходится около 7 %;

- для известняка оолитового, пелоидно-оолитового, оолитово-пелоидного, интракластово-оолитового (ЛТ 2) по сравнению с охарактеризованными выше литотипами свойственно более низкое содержание кальцита (82 %) и почти вдвое выше содержание доломита (~11 %) и НО (~7 %);
- среди всех литотипов ЛТ 4, состоящий из вторичных доломитов, имеет иное содержание карбонатных минералов и преимущественно сложен доломитом (89 %).

Различное соотношение кальцита, доломита и НО в литотипах указывает на неидентичные условия осадконакопления и постседиментационные преобразования.

Высокие концентрации кальцита в ЛТ 1 и ЛТ 3, вероятно, свойственны зоне накопления продуктов разрушения рифогенных построек и формирования «иловых холмов».

Более низкое содержание кальцита в ЛТ 2, возможно, характерно для зоны, где усиливается влияние песчано-глинистого материала, переносимого с суши, т. е. зарифового шельфа.

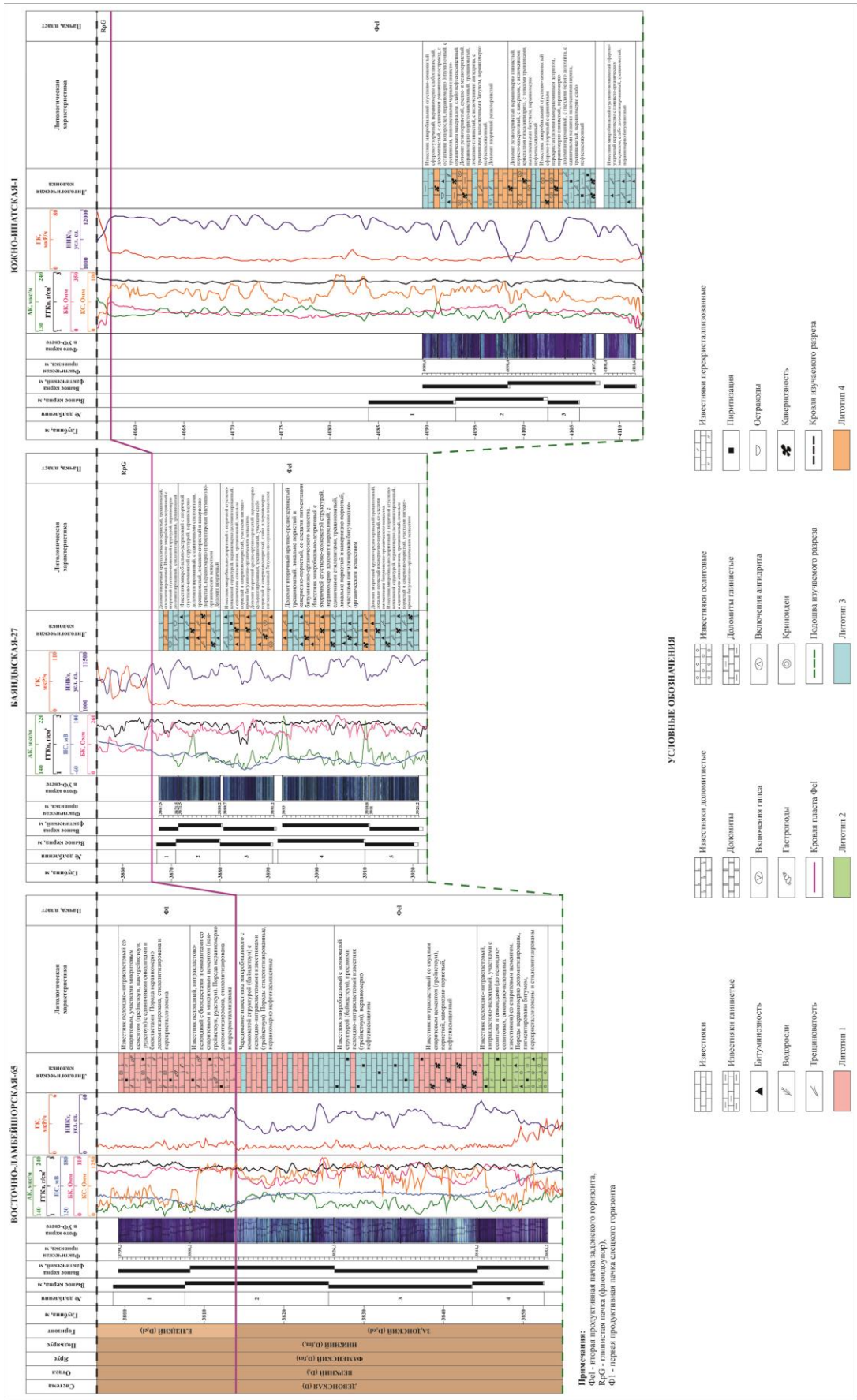
Преобладание минерала доломита в ЛТ 4 указывает, вероятно, на постседиментационное преобразование первичных микробияльных известняков.

#### Результаты фациальных и палеогеографических реконструкций

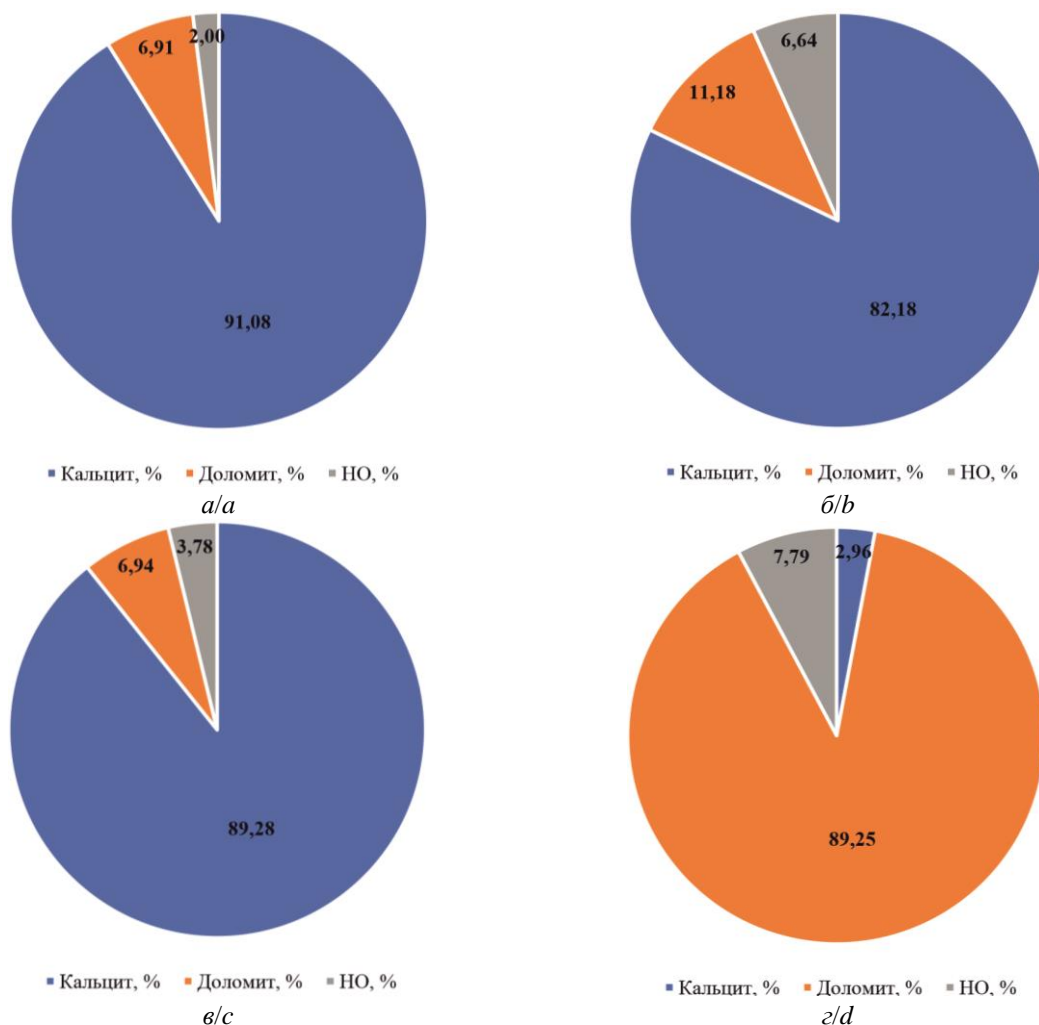
На основе широко применяемой за рубежом и в России модели стандартных фациальных поясов Дж. Уилсона и выделенных ранее авторами литотипов задонско-елецких рифогенных отложений было проведено реконструирование фациальных обстановок осадконакопления.

На рис. 6 приведена схема стандартных фациальных поясов с привязкой к ней выделенных литотипов на основе их литогенетических особенностей, которые отражают характер седиментации, выраженный в структурно-текстурном строении осадков.

Согласно построенной схеме, литотипы задонско-елецких отложений южной части Денисовского прогиба характеризуют обстановки осадконакопления в пределах мелководья, рифогенной зоны и передового склона. ЛТ 1, 2 – известняки пелоидные, интракластовые, оолитовые и оолитные (рудстоуны, грейнстоуны, пакстоуны) сформировались в условиях высокоподвижной водной среды в результате разрушения и перемыва течениями и волнениями рифовых построек – «иловых холмов». Рифовые грубообломочные известняки (рудстоуны) (рис. 6, а) определяют обстановки передового склона рифогенной постройки. Зернистые разновидности известняков – грейнстоуны и пакстоуны – характерны для зарифового мелководья (оолитовые и оолитные известняки) (рис. 6, з–е), но также и для передового склона (рис. 6, б). ЛТ 3 – микробияльные, микробияльно-детритовые известняки (баундстоуны) (рис. 6, ж–и) – типичные рифогенные отложения, образующие органогенную постройку – «иловый холм» – на краю карбонатной платформы. ЛТ 4 – вторичные доломиты (рис. 6, к–м) представляют собой продукт, сформировавшийся в результате замещения доломитами известкового осадка либо литифицированных микробияльных известняков.



**Рис. 4.** Схема корреляции задонско-елетских отложений по линии скважин Восточно-Ламбейшорская-65, Баяндская-27 и Южно-Ирпатская-1, с изменением литотипов пород по разрезу и площади юга Денисовского прогиба  
**Fig. 4.** Scheme of correlation of the Zadoro-Elets sediments along the East-Lambeyshorre-65, Bayandy-27 and South-Irpatisk-1 wells, with changes in rock lithotypes along the section and area of the southern Denison depression



**Рис. 5.** Круговые диаграммы соотношения среднего содержания кальцита, доломита и НО в литотипах задонско-елецких отложений: а) ЛТ 1; б) ЛТ 2; в) ЛТ 3; г) ЛТ 4

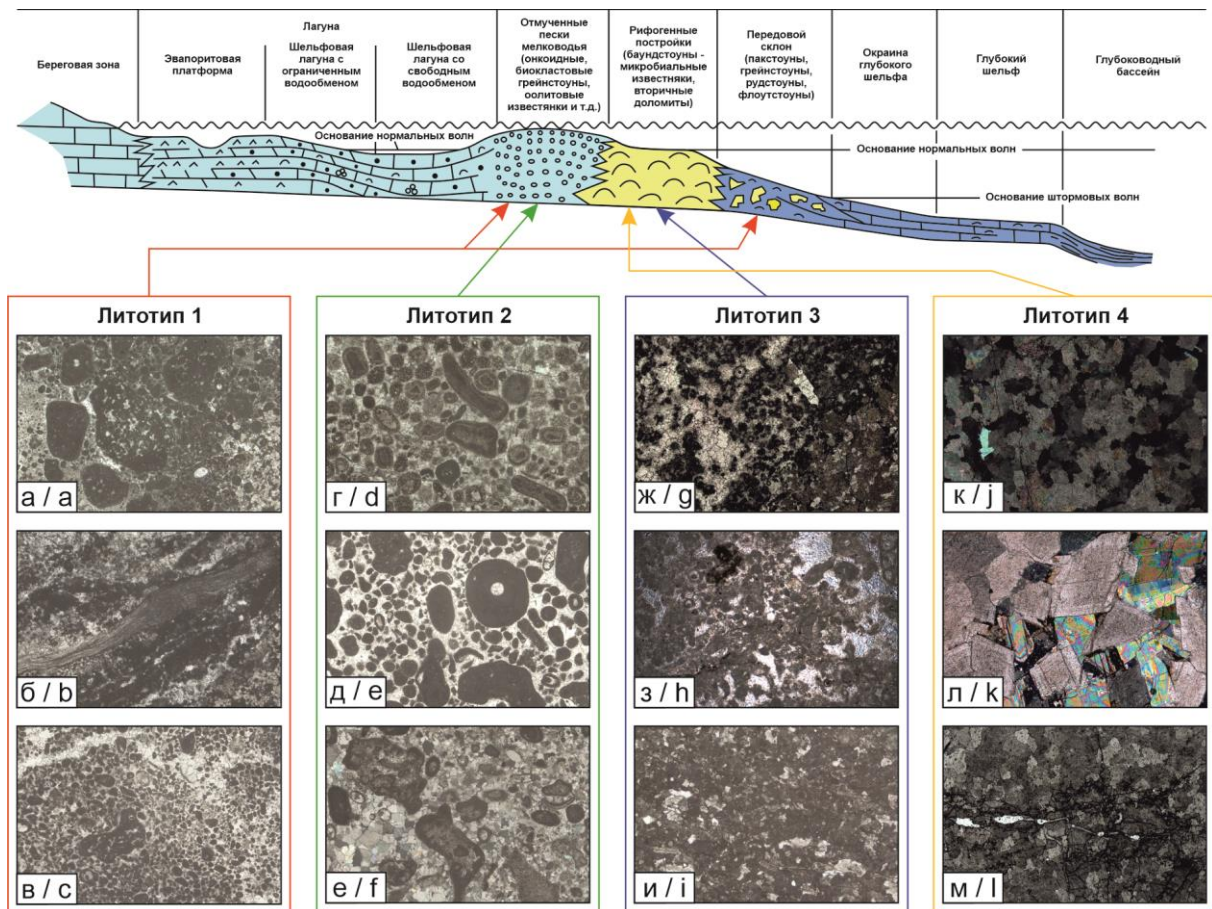
**Fig. 5.** Pie charts of the average calcite, dolomite, and insoluble residue content ratios in the lithotypes of the Zadon-Elets sedimentary deposits: а) LT 1; б) LT 2; в) LT 3; г) LT 4

Таким образом, интерпретация обстановок седиментации литотипов задонско-елецких отложений изучаемых скважин показывает, что область мелководно-шельфового осадконакопления Денисовского прогиба характеризуется полифациальным строением. Породы из скв. Восточно-Ламбейшорская-65 откладывались в пределах трех фациальных зон – передового склона, рифогенной зоны и зарифового мелководья. Иная картина наблюдается для отложений из разрезов скв. Баяндыская-27 и Южно-Ипатская-1, где породы формировались на краю платформы в виде рифогенной постройки – «микробиального холма», и частично подверглись постседиментационным изменениям в виде замещения известняков вторичными доломитами.

Формированию раннефаменских отложений предшествовало региональное прогибание в франское время территории Тимано-Печорского бассейна, вследствие чего произошло заложение относительно глубоководного бассейна с некомпенсированным осадконакоплением. В среднем фране бассейн достиг максимальных размеров. В дальнейшем, на протяжении позднего франы, темпы погружения территории

замедлились и резко сократилась площадь распространения умеренно-глубоководного шельфа. В фаменском веке произошел ряд трансгрессивно-регрессивных циклов, но в целом нисходящие движения бассейна имели незначительную интенсивность и характер постепенного затухания. Тем самым область некомпенсированного (депрессивного) осадконакопления значительно переместилась в восточную часть Тимано-Печорского бассейна.

Территория юга Денисовского прогиба в раннефаменское время представляла собой карбонатную платформу с цепочкой «микробиальных холмов», вытянутых в субмеридиональном направлении. Под «микробиальными холмами» подразумеваются постройки, морфологически выраженные в рельефе мелководного шельфа в виде рифогенных массивных толщ. Распределение литотипов задонско-елецких пород по разрезу и площади изучаемой территории указывает на существование в раннефаменское время различных обстановок седиментации в области микробиальных холмов, обрамленных с запада мелководным шельфом, а с востока – депрессионной впадиной (рис. 7).



**Рис. 6.** Примеры выделенных литотипов задонско-елецких отложений с привязкой к схеме стандарта фациальных поясов Дж. Уилсона. ЛТ 1 (скв. Восточно-Ламбейшорская-65, D<sub>3zd-el</sub>): а) известняк пеллоидно-интракластовый (рудстоун); б) известняк биокластово-пеллоидный (пакстоун и грейнстоун); в) известняк пеллоидный (грейнстоун); ЛТ 2 (скв. Восточно-Ламбейшорская-65, D<sub>3zd</sub>): г) известняк оолитовый (грейнстоун); д) известняк онкоидно-пеллоидный (грейнстоун); е) известняк интракластово-оолитовый (грейнстоун); ЛТ 3: ж) известняк микробальный (баундстоун), скв. Южно-Ипатская-1, D<sub>3zd</sub>; з) известняк микробально-детритовый (баундстоун), скв. Баяндыская-27, D<sub>3zd</sub>; и) известняк микробальный (баундстоун), скв. Восточно-Ламбейшорская-65, D<sub>3zd</sub>; ЛТ 4: к) доломит вторичный, скв. Южно-Ипатская-1, D<sub>3zd</sub>; л) доломит вторичный, скв. Баяндыская-27, D<sub>3zd</sub>; м) доломит вторичный, скв. Южно-Ипатская-1, D<sub>3zd</sub>

**Fig. 6.** Examples of identified lithotypes of the Zadon-Elets sediments with relation to the scheme of J. Wilson's standard facies belts. LT 1 (well East Lambayshore-65, D<sub>3zd-el</sub>): a) peloid-intraclastic limestone (rudstone); b) bioclastic-peloid limestone (pakstone and greinstone); c) peloid limestone (greinstone); LT 2 (well East-Lambeyshore-65, D<sub>3zd</sub>): d) oolitic limestone (greinstone); e) oncoid-peloid limestone (greinstone); f) intraclastic-peloid limestone (greinstone); LT 3: g) microbial limestone (boudstone), well South Ipatisk-1, D<sub>3zd</sub>; h) microbial-detrital limestone (boudstone), well Bayandy-27, D<sub>3zd</sub>; i) microbial limestone (boudstone), well East-Lambeyshore-65, D<sub>3zd</sub>; LT 4: j) secondary dolomite, well South Ipatisk-1, D<sub>3zd</sub>; k) secondary dolomite, well Bayandy-27, D<sub>3zd</sub>; l) secondary dolomite, well South Ipatisk-1, D<sub>3zd</sub>

Исходя из анализов палеогеографических схем юга Денисовского прогиба, можно отметить, что для раннезадонского времени характерно преимущественно развитие фаций с микробальными холмами на севере и северо-западе территории и атоллвидных структур на юго-западе, во внутренней части которых обособились лагунные обстановки осадконакопления (Лайско-Лодминский атолл) (рис. 7, а). В позднезадонское время окраина мелководного шельфа значительно продвинулась на восток, что привело к широкому распространению зарифовых мелководно-

шельфовых обстановок с узкой цепочкой микробальных холмов (барьерных рифов), протягивающихся в северо-западном и северо-восточном направлениях (рис. 7, б). По сравнению с позднезадонским бассейном раннеелецкий бассейн осадконакопления имел те же границы развития и контролировался преимущественно зарифовыми мелководно-шельфовыми обстановками седиментации и формированием на окраине мелководно-шельфового моря первых раннеелецких рифогенных построек (рис. 7, в).

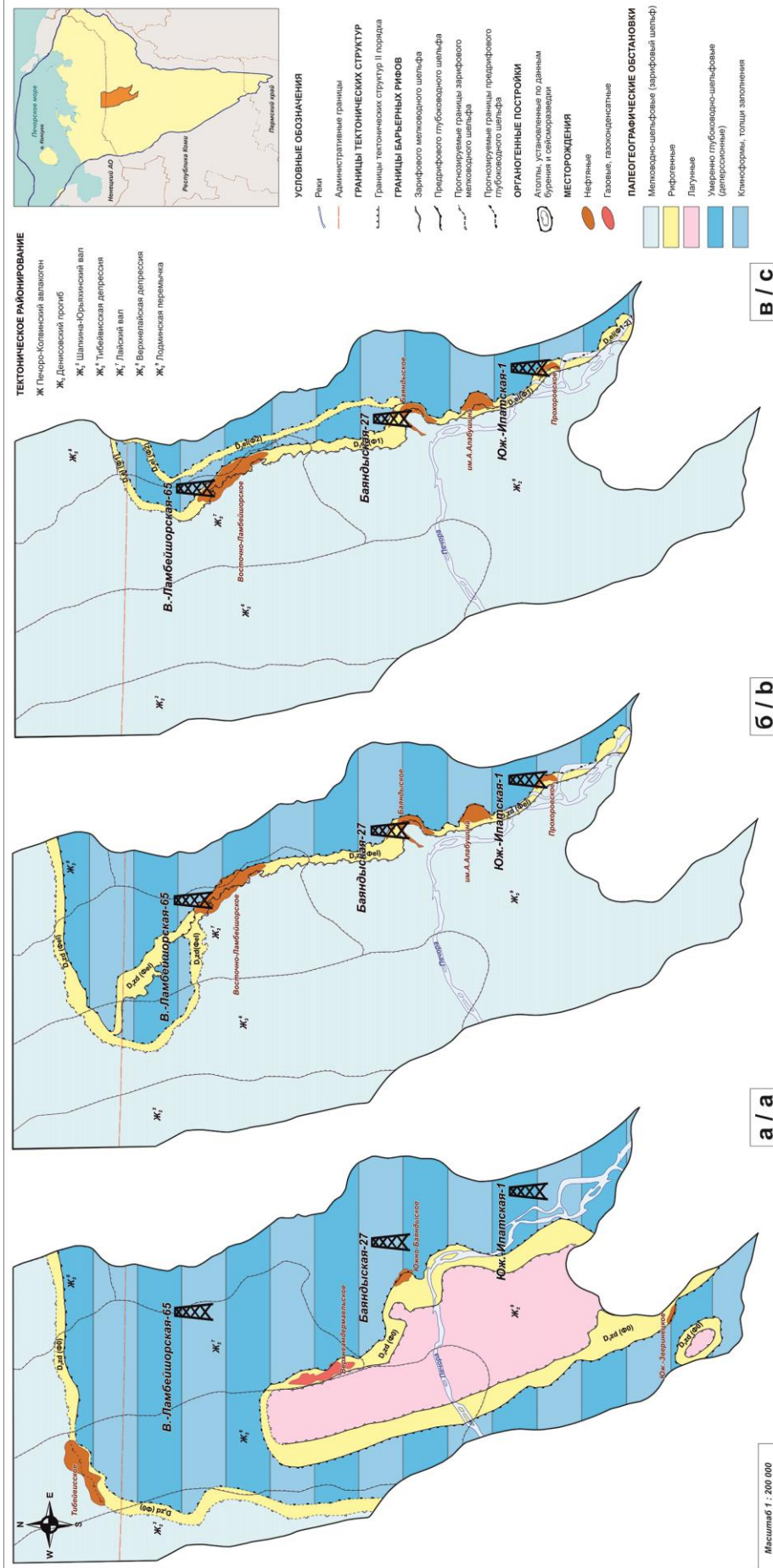


Рис. 7. Палеогеографические схемы юга Денисовского прогиба в раннем фамене (ТП НИЦ, 2019 [32], с изменениями авторов): а) раннеелетское время; б) позднезатонское время; в) раннезатонское время

Fig. 7. Paleogeographic schemes of the south of the Denisov depression in the Early Fenian (TP SRC, 2019 [32], with modifications by the authors): а) Early Elets time; б) Late Zaton time; в) Early Elets time

### Заключение

Подводя итоги изучения условий формирования рифогенных раннефаменских отложений из разрезов трех скважин, расположенных на юге Денисовского прогиба, можно сделать следующие выводы. Анализ материалов литолого-седиментологических исследований керна и шлифов задонских и елецких рифогенных отложений позволил выделить среди них четыре литотипа пород, которые объединяются в две группы. К первой группе относятся баундстоуны – микробияльные и микробияльно-детритовые известняки, исходные компоненты у которых в процессе осадконакопления были скреплены между собой, а вторая группа – рудстоуны, грейнстоуны и пакстоуны – известняки пелоидные, интракластовые, оолитовые, пелоидно-оолитовые, оолитово-пелоидные, интракластово-оолитовые, исходные компоненты у которых не были скреплены между собой при осадконакоплении. Согласно анализу результатов определения карбонатности породы задонского и елецкого возраста на 93–98 % сложены карбонатными минералами – кальцитом и доломитом. Наибольшие концентрации кальция свойственны ЛТ 1 и ЛТ 3, доломита – ЛТ 4.

Результаты реконструирования фациальных обстановок осадконакопления позволили установить, что накопление раннефаменских отложений происхо-

дило в трех фациальных зонах: передового склона (переходной к глубоководному шельфу), микробияльного холма (рифовой постройки) и мелководья (переходная к зарифовому мелководному шельфу). Согласно палеогеографическим схемам раннефаменского времени территория юга Денисовского прогиба представляла собой карбонатную платформу с развитой и вытянутой в преимущественно субмеридиональном направлении цепочкой барьерных рифов и широко распространенного зарифового мелководного моря.

Активный тектонический режим в позднедевонское время на территории Тимано-Печорского бассейна сыграл ключевую роль в образовании рифогенных толщ раннефаменского возраста. Трансгрессивно-регрессивные колебания уровня моря наряду с изменением климата и влиянием пресных вод, сносимых с суши, способствовали формированию полифациального строения рифогенных зон и их постседиментационным преобразованиям.

Полученные результаты изучения раннефаменских рифогенных отложений имеют важное значение при поиске перспективных структур на территории юга Денисовского прогиба.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00111.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колоколова И.В. Прогноз нефтегазоносности рифовых объектов в доманиково-турнейских природных резервуарах Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и системные оценки рисков геологоразведочных работ: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М.: ИПНГ РАН, 2021. – 135 с.
2. Саэтгараев А.Д., Фатеев В.С., Соловьев С.И. Результаты поисково-разведочных работ ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» за период 2014–2018 гг. // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО Российской АН, Геопринт, 2019. – Т. I. – С. 35–37.
3. Саэтгараев А.Д., Савельева А.А., Борщевская Н.И. Крупные открытия на рубеже XX–XXI веков // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО Российской АН, Геопринт, 2019. – Т. III. – С. 12–15.
4. Бояршинова М.Г., Уткина М.Н. Литолого-петрографическая характеристика и условия седиментации верхнедевонских карбонатных отложений в зоне рифового плато Зырянского рифа (Соликамская депрессия, Предуральский прогиб) // 13 Уральское литологическое совещание: материалы конференции. – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2020. – С. 27–29.
5. Бояршинова М.Г., Антонюк О.В., Уткина М.Н. Верхнедевонские микробиилиты Зырянского изолированного рифа (северная часть Волго-Уральской НГП) // Геология рифов: материалы Всероссийского литологического совещания. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО Российской АН, Геопринт, 2020. – С. 32–34.
6. Прогноз развития неантиклинальных ловушек углеводородов в верхнедевонско-турнейских карбонатных отложениях на территории северных районов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции / Н.Е. Соснин, С.Г. Филиппова, С.В. Макарова, Л.Ю. Корепанова, И.А. Вилложева // Недропользование. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 156–162.
7. Закономерности распределения органогенных построек и залежей нефти в верхнедевонско-турнейском карбонатном комплексе в пределах платформенного Башкортостана / Н.А. Неудачин, Г.Р. Ханнанова, Р.В. Мирнов, П.А. Луканова, А.З. Вакилова // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 5. – С. 22–25.
8. Роль органогенных построек верхнедевонско-турнейского карбонатного комплекса в формировании ловушек и залежей УВ / Н.А. Неудачин, Р.В. Мирнов, П.А. Ахмерова, Г.Р. Вильданова // Геология и геофизика–2022 наука, производство, инновации: материалы II Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2022. – С. 196–199.
9. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности доманикоидной высокоуглеродистой формации центральной части Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна / М.Ю. Карпушин, А.В. Ступакова, А.П. Завьялова, А.А. Сусллова, В.В. Чупахина, К.А. Радченко // Георесурсы. – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 129–138.
10. Microfacies analysis and depositional environment of the Upper Devonian Dankovo-Lebedyansky sediments, Tatarstan, Volga-Ural Basin, Russia / Y. Ibrahim, V.P. Morozov, A.N. Kolchugin, V. Sudakov, I. Idrisov, A. Leontev // Petroleum Research. – 2022. – № 7. – P. 1–12.
11. Impact of microfacies and diagenesis on the reservoir quality of Upper Devonian carbonates in Southeast Tatarstan, Volga-Ural Basin, Russia / Y. Ibrahim, V.P. Morozov, A.N. Kolchugin, A. Leontev, Tahhan Fatmeh // Petroleum Research. – 2022. – № 10. – P. 1–18.
12. Николаева Л.А., Филиппов Е.В., Поливанов С.А. Перспективы нефтегазоносности карбонатного комплекса девонских отложений на севере Оренбургской области // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 10. – С. 20–24.
13. Верхнепалеозойские рифовые системы Рубежинского прогиба южная часть Бузулукской впадины / А.П. Вилесов, В.С. Леденев, Д.В. Солодов, А.В. Филичев, Н.В. Богомолова, Л.И. Макарова, Н.Ю. Гребенкина, А.Г. Казачкова, А.С. Сидубаев // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 3. – С. 30–42.
14. Кузьмина В.В., Котенев Ю.А. Литолого-фациальная неоднородность сложных коллекторов верхнедевонских рифов Оренбургской области // XX научно-практическая конференция «Инновационные решения в геологии и разработке ТРИЗ». – М., 2021. – С. 215–223.

15. Кузнецов В.Г., Журавлева Л.М. Рифовые образования Западно-Канадского бассейна и их нефтегазоносность // Литология и полезные ископаемые. – 2018. – № 3. – С. 257–273.
16. A reservoir model for geothermal energy production from the Middle Devonian Slave Point Formation / E. Renaud, J.A.W. Weissenberger, N.B. Harris, J. Banks, B. Wilson // Marine and Petroleum Geology. – 2021. – V. 129. – № 5. – P. 1–24.
17. Higley D.K. Assessment of undiscovered conventional oil and gas resources of the Western Canada Sedimentary Basin, Canada // National and Global Petroleum Assessment. – 2012. – № 2012-3148. – P. 1–4.
18. Забанбарк А. Структурные черты и перспективы нефтегазоносности бассейнов западной и северо-западной окраин Австралии // Океанология. – 2010. – Т. 50. – № 2. – С. 292–305.
19. Hydrogen storage potential of depleted oil and gas fields in Western Australia / A. Craig, S. Newman, P. Stephenson, Ch. Evans, Sh. Yancazos, S. Barber // The APPEA Journal. – 2022. – V. 62. – № 1. – P. 185–195.
20. Assessment of undiscovered oil and gas resources in the Canning Basin Province, Australia / Ch.J. Schenk, M.E. Tennyson, T.J. Mercier, Ch.A. Woodall, Th.M. Finn, Ph.A. Le, M.E. Brownfield, S.B. Gaswirth, K.R. Marra, H.M. Leathers-Miller // National and Global Petroleum Assessment. – 2018. – № 2018-3023. – P. 1–4.
21. Chang-Min Yu, Yue Li, Kun Liang. Devonian reef development and strata-bound ore deposits in South China // Journal of Palaeogeography. – 2021. – V. 10. – № 4. – P. 571–583.
22. Jianwei Shen, Webb G.E., Hairuo Qing. Microbial mounds prior to the Frasnian-Famennian mass extinctions, Hantang, Guilin, South China // Sedimentology. – 2010. – V. 57. – P. 1615–1639.
23. Кузнецов В.Г. Асинхронность развития рифов и рифостроящей биоты. Палеозой // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 54–62.
24. Bond D.P.G., Wignall P.B., Racki G. Extent and duration of marine anoxia during the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction in Poland, Germany, Austria and France // Geological Magazine. – 2004. – V. 141. – № 2. – P. 173–193.
25. Jobst Wendt. Middle and Late Devonian sea-level changes and synsedimentary tectonics in the eastern Anti-Atlas (Morocco) // Journal of African Earth Sciences. – 2021. – V. 182. – P. 1–16.
26. Eichholt S., Becker R.T. Middle Devonian reef facies and development in the Oued Cherrat Zone and adjacent regions (Moroccan Meseta) // Facies. – 2016. – V. 62. – № 7. – P. 1–29.
27. Palaeoenvironmental and sequence-stratigraphic analysis of the Middle-Late Devonian carbonates (Bahram Formation) of Anarak, western Central Iran / Mohammad Ali Salehi, Ali Bahrami, Sanaz Moharrami, Hossein Vaziri-Moghaddam, Hamid Reza Pakzad, Bahareh Shakeri // Journal of African Earth Sciences. – 2020. – V. 171. – № 4. – P. 1–18.
28. Devonian/Lower Carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran. Part II. Northern and central Iran / J. Wendt, B. Kaufmann, Z. Belka, N. Farsan, A. Bavandpur // Acta Geologica Polonica. – 2005. – V. 55. – № 1. – P. 31–97.
29. Девонские рифогенные образования Урала и смежных территорий Восточно-Европейской платформы и Западной Сибири / Б.И. Чувашов, Н.В. Сенников, А.Л. Анфимов, Н.К. Бахарев, Н.Г. Изох // Литосфера. – 2015. – № 4. – С. 43–61.
30. Пармузина Л.В. Верхнедевонский комплекс Тимано-Печорской провинции (строение, условия образования, закономерности размещения коллекторов и нефтегазоносность). – СПб.: Недра, 2007. – 151 с.
31. Матвеева Н.А. Условия образования фаменских рифогенных отложений Центрально-Хорейверского вала Тимано-Печорской провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12. – № 2. – С. 1–28.
32. Петренко Е.Л. Перспективы нефтегазоносности полифациальных верхнедевонских отложений в южной части Денисовской впадины // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО Российской АН, Геопринт, 2019. – Т. III. – С. 95–98.
33. Даниленко А.Н., Савельева А.А., Борщевская Н.И. Новые данные о геологическом строении и перспективах нефтегазоносности рифогенных отложений верхнего девона Денисовского прогиба // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 41–45.
34. Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture: Classification of carbonate rocks // American Association of Petroleum Geologists Memoir. – 1962. – V. 1. – P. 108–121.
35. Wilson J.L. Carbonate facies in geologic history. – Berlin: Springer-Verlag, 1975. – 471 p.

Поступила 26.09.2022 г.

Дата рецензирования: 06.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Кривощев С.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Боталов А.Н.**, младший научный сотрудник кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 553.98:551.83:551.734.5

## STRUCTURAL FEATURES AND FORMATION CONDITIONS OF EARLY FAMENIAN RIFFOGENIC SEDIMENTS IN THE SOUTHERN PART OF THE DENISOV DEPRESSION OF THE TIMAN-PECHORA OIL AND GAS PROVINCE

Sergey N. Krivoschekov<sup>1</sup>,  
krivoschekov@gmail.com

Andrey N. Botalov<sup>1</sup>,  
botalov97@yandex.ru

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

**Relevance.** Currently, due to the growth of hard-to-recover resources and hydrocarbon reserves, the study of carbonate rocks of complex structure, in particular the Zadon-Eelets sediments of the Upper Devonian-Tournaisian oil and gas complex of the Denisov depression of the Timan-Pechora oil and gas province, is becoming more relevant. As it is known, the Devonian period in the history of the Timan-Pechora basin is of great importance due to the extensive development of reef sediments, which represent potential zones of oil and gas accumulation. The study of the general features of the structure and the analysis of materials based on the results of macro- and micropetrographic studies of the core will allow reconstructing the facies zonality and paleogeographic conditions of sedimentation of the Zadon-Eelets reef structures as promising objects for the search for oil and gas fields.

**Aim:** study the general features of the structure and lithological and petrographic features of the Zadon-Eelets riphogenic sediments of the Denisov depression, in order to reconstruct their facies zonality, environments and conditions of formation.

**Objects:** Zadon-Eelets riphogenic sediments of the Famennian Stage of the Upper Devonian in the southern part of the Denisov depression of the Timan-Pechora oil and gas province.

**Methods:** lithological-facies analysis and paleogeographic reconstructions based on the analysis of materials, including a complex of geo-physical studies of wells, photographs of columns and sections core, the results of the study of carbonate content rocks, lithological-sedimentological description of the core, as well as photographs and micropetrographic description of the thin rock section.

**Results.** The paper introduces the results of the study of Early Famennian riphogenic sediments, which are potential zones of oil and gas accumulation in the south of the Denisov depression of the Timan-Pechora oil and gas province. The variability of rocks by section and area of the studied region was traced, which made it possible to identify four lithotypes of rocks that are combined into two groups. The material composition of rocks was studied based on the analysis of definitions of carbonate content. The rocks are composed of carbonate minerals – calcite and dolomite – by 93–98 %. Macro- and micropetrographic analysis of structural and textural features of lithotypes using the well-known model of standard facies belts, developed by J. Wilson, allowed reconstructing the facies conditions of sedimentation of the Early Famennian sediments. Rocks were accumulated in three facies zones of the shallow-shelf carbonate platform: an advanced slope, a microbial hill and shallow water, which determined their complex polyfacial structure.

### Key words:

Facies, lithologic-facial zoning, Zadon-Eelets sediments, Upper Devonian, Denisov depression, Timan-Pechora oil and gas province.

The research was carried out using the funds of grant of the Russian Science Foundation no. 22-17-00111.

### REFERENCES

- Kolokolova I.V. *Prognoz neftegazonosnosti rifovykh obyektov v domanikovo-turneyskikh prirodnykh rezervuarakh Timano-Pechorskoy neftegazonosnoy provintsii i sistemnye otsenki riskov geologorazvedochnykh rabot*. Diss. Kand. nauk [Prediction of oil and gas content of reef objects in the Domanic-Tournaisian natural reservoirs of the Timan-Pechora oil and gas province and system risk assessment of exploration. Cand. Diss.]. Moscow, 2021. 135 p.
- Sayetgaraev A.D., Fateev V.S., Solovyev S.I. *Rezultaty poiskovo-razvedochnykh rabot OOO «LUKOYL-Komi» za period 2014–2018 gg.* [Results of prospecting and exploration work by OOO LUKOIL-Komi for 2014–2018]. *Geologiya i mineralnye resursy Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii. Materialy XVII Geologicheskogo syezda Respubliki Komi* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Materials of the XVII Geological Congress of the Komi Republic]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Geoprint, 2019. Vol. I, pp. 35–37.
- Sayetgaraev A.D., Savelyeva A.A., Borshchevskaya N.I. *Krupnye otkrytiya na rubezhe XX–XXI vekov* [Major discoveries at the turn of the XX–XXI centuries]. *Geologiya i mineralnye resursy Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii. Materialy XVII Geologicheskogo syezda Respubliki Komi* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Materials of the XVII Geological Congress of the Komi Republic]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Geoprint, 2019. Vol. III, pp. 12–15.
- Boyarshinova M.G., Utkina M.N. *Litologo-petrograficheskaya kharakteristika i usloviya sedimentatsii verkhnedevonskikh karbonatnykh otlozheniy v zone rifovogo plato Zyryanskogo rifa (Solikamskaya depressiya, Preduralskiy progib)* [Lithological and petrographic characteristics and sedimentation conditions of Upper Devonian carbonate sediments in the Zyryan reef plateau zone (Solikamsk depression, Pre-Ural trough)]. *13 Uralskoe litologicheskoe soveshchanie. Materialy konferentsii* [13<sup>th</sup> Ural lithological meeting. Conference materials]. Ekaterinburg, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, 2020. pp. 27–29.
- Boyarshinova M.G., Antonyuk O.V., Utkina M.N. *Verkhnedevonskie mikrobiolity Zyryanskogo izolirovannogo rifa (sevnaya chast Volgo-Uralskoy NGP)* [Devonian microbialites of the Zyryan isolated reef (northern part of the Volga-Ural OGP)]. *Geologiya rifov. Materialy Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Geology of reefs. Materials of the All-Russian lithological meeting]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Geoprint, 2020. pp. 32–34.
- Sosnin N.E., Filippieva S.G., Makarova S.V., Korepanova L.Yu., Vilyuzheva I.A. *Prediction of non-anticlinal hydrocarbon traps de-*



- velopment in Upper Devonian-Tournaisian carbonate sediments in the northern regions of the Volga-Ural oil and gas province. *Subsoil Use*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 156–162. In Rus.
7. Neudachin N.A., Khannanova G.R., Mirnov R.V., Lukanova P.A., Vakilova A.Z. Laws of distribution of organogenic structures and oil accumulations in the Upper Devonian-Tournaisian carbonate complex within platformed Bashkortostan. *Oil industry*, 2020, no. 5, pp. 22–25. In Rus.
  8. Neudachin N.A., Mirnov R.V., Akhmerova P.A., Vildanova G.R. Rol organogennykh postroek verkhnedevonsko-turneyskogo karbonatnogo kompleksa v formirovaniy lovushek i zalezhey UV [The role of organogenic structures of the Upper Devonian-Tournaisian carbonate complex in the formation of traps and HC accumulations]. *Geologiya i geofizika–2022 nauka, proizvodstvo, innovatsii. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology and geophysics–2022. Science, production, innovations. Materials of II International scientific and practical conference]. Ufa, 2022. pp. 196–199.
  9. Karpushin M.Yu., Stupakova A.V., Zavyalova A.P., Suslova A.A., Chupakhina V.V., Radchenko K.A. Geological structure and prospects of oil and gas content of the domanikoid high-carbon formation of the central part of the Volga-Ural oil and gas bearing basin. *Georesurs*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 129–138. In Rus.
  10. Ibrahim Y., Morozov V.P., Kolchugin A.N., Sudakov V., Idrisov I., Leontev A. Microfacies analysis and depositional environment of the Upper Devonian Dankovo-Lebedyansky sediments, Tatarstan, Volga-Ural Basin, Russia. *Petroleum Research*, 2022, no. 7, pp. 1–12.
  11. Ibrahim Y., Morozov V.P., Kolchugin A.N., Leontev A., Tahhan Fatmeh Impact of microfacies and diagenesis on the reservoir quality of Upper Devonian carbonates in Southeast Tatarstan, Volga-Ural Basin, Russia. *Petroleum Research*, 2022, no. 10, pp. 1–18.
  12. Nikolaeva L.A., Filippov E.V., Polivanov S.A. Prospects of oil and gas bearing capacity of carbonate complex of Devonian sediments in the north of the Orenburg region. *Oil Industry*, 2020, no. 10, pp. 20–24. In Rus.
  13. Vilesov A.P., Ledenev V.S., Solodov D.V., Filichev A.V., Bogomolova N.V., Makarova L.I., Grebenkina N.Yu., Kazachkova A.G., Sidubaev A.S. Upper Paleozoic reef systems of the Rubezhin depression south of the Buzuluk trough. *PRONEFT. Professionally about oil*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 30–42. In Rus.
  14. Kuzmina V.V., Kotenev Yu.A. Litologo-fatsialnaya neodnorodnost slozhnykh kollektorov verkhnedevonskikh rifov Orenburgskoy oblasti [Lithological and facial heterogeneity of complex reservoirs of Upper Devonian reefs of the Orenburg region]. *XX nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Innovatsionnye resheniya v geologii i razrabotke TRIZ* [XX scientific-practical conference. Innovative solutions in geology and TRIZ development]. Moscow, 2021. pp. 215–223.
  15. Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Rifovye obrazovaniya Zapadno-Kanadskogo basseyna i ikh neftegazonosnost [Reef formations of the Western Canadian basin and their oil and gas content]. *Litologiya i poleznye iskopayemye*, 2018, no. 3, pp. 257–273.
  16. Renaud E., Weissenberger J.A.W., Harris N. B., Banks J., Wilson B. A reservoir model for geothermal energy production from the Middle Devonian Slave Point Formation. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, vol. 129, no. 5, pp. 1–24.
  17. Higley D.K. Assessment of undiscovered conventional oil and gas resources of the Western Canada Sedimentary Basin, Canada. *National and Global Petroleum Assessment*, 2012, no. 2012-3148, pp. 1–4.
  18. Zabanbark A. Structural features and prospects of oil and gas bearing basins of the Western and Northwestern margins of Australia. *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 2, pp. 292–305. In Rus.
  19. Craig A., Newman S., Stephenson P., Evans Ch., Yancazos Sh., Barber S. Hydrogen storage potential of depleted oil and gas fields in Western Australia. *The APPEA Journal*, 2022, vol. 62, no. 1, pp. 185–195.
  20. Schenk Ch.J., Tennyson M.E., Mercier T.J., Woodall Ch.A., Finn Th.M., Le Ph.A., Brownfield M.E., Gaswirth St.B., Marra K.R., Leathers-Miller H.M. Assessment of undiscovered oil and gas resources in the Canning Basin Province, Australia. *National and Global Petroleum Assessment*, 2018, no. 2018-3023, pp. 1–4.
  21. Chang-Min Yu, Yue Li, Kun Liang. Devonian reef development and strata-bound ore deposits in South China. *Journal of Palaeogeography*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 571–583.
  22. Shen J., Webb G.E., Q. Hairuo. Microbial mounds prior to the Frasnian-Famennian mass extinctions, Hantang, Guilin, South China. *Sedimentology*, 2010, vol. 57, pp. 1615–1639.
  23. Kuznetsov V.G. Asynchrony of reef development and reef-building biota. Paleozoic. *Proceedings of higher educational institutions. Geology and Exploration*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 54–62. In Rus.
  24. Bond D.P.G., Wignall P.B., Racki G. Extent and duration of marine anoxia during the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction in Poland, Germany, Austria and France. *Geological Magazine*, 2004, vol. 141, no. 2, pp. 173–193.
  25. Middle J.W. Late Devonian sea-level changes and synsedimentary tectonics in the eastern Anti-Atlas (Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 182, pp. 1–16.
  26. Eichholt S., Becker R.Th. Middle Devonian reef facies and development in the Oued Cherrat Zone and adjacent regions (Moroccan Meseta). *Facies*, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 1–29.
  27. Mohammad Ali Salehi, Ali Bahrami, Sanaz Moharrami, Hossein Vaziri-Moghaddam, Hamid Reza Pakzad, Bahareh Shakeri. Palaeoenvironmental and sequence-stratigraphic analysis of the Middle-Late Devonian carbonates (Bahram Formation) of Anarak, western Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, vol. 171, no. 4, pp. 1–18.
  28. Wendt J., Kaufmann B., Belka Z., Farsan N., Bavandpur A. Devonian/Lower Carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran. Part II. Northern and central Iran. *Acta Geologica Polonica*, 2005, vol. 55, no. 1, pp. 31–97.
  29. Chuvashov B.I., Sennikov N.V., Anfimov A.L., Bakharev N.K., and Izokh N.G. Devonian rifting formations of the Urals and adjacent territories of the East European Platform and West Siberia. *Lithosphere*, 2015, no. 4, pp. 43–61. In Rus.
  30. Parmuzina L.V. *Verkhnedevonskiy kompleks Timano-Pechorskoy provintsii (stroenie, usloviya obrazovaniya, zakonovernosti razmeshcheniya kollektorov i neftegazonosnosti)* [Upper Devonian complex of the Timan-Pechora province (structure, conditions of formation, patterns of reservoir location and oil and gas content)]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2007. 152 p.
  31. Matveeva N.A. Conditions of formation of Famennian rifting formations of the Central-Khoreyver rampart of Timan-Pechora province. *Oil and Gas Geology. Theory and practice*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 1–28. In Rus.
  32. Petrenko E.L. Perspektivy neftegezonosnosti polifatsialnykh verkhnedevonskikh otlozheniy v yuzhnoy chasti Denisovskoy vpadiny [Prospects for the oil and gas potential of polyfacial Upper Devonian deposits in the southern part of the Denisov Depression]. *Geologiya i mineralnye resursy Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii. Materialy XVI Geologicheskogo syezda Respubliki Komi* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: materials of the XVII Geological Congress of the Komi Republic]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Geoprint, 2019. Vol. III. pp. 95–98.
  33. Danilenko A.N., Savelieva A.A., Borshevskaya N.I. New data on geological structure and oil-and-gas bearing perspectives of deposits in the Upper Devonian reefs of the Denisov Depression. *Oil Economy*, 2017, no. 2, pp. 41–45. In Rus.
  34. Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture: Classification of carbonate rocks. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1962, vol. 1, pp. 108–121.
  35. Wilson J.L. *Carbonate facies in geologic history*. Berlin, Springer-Verlag, 1975. 471 p.

Received: 26 September 2022.

Reviewed: 6 December 2022.

#### Information about the authors

**Sergey N. Krivoschekov**, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Andrey N. Botalov**, junior researcher, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 534.22

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНУЮ СИСТЕМУ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДОВ

Азин Антон Владимирович<sup>1</sup>,  
antonazin@mail.ru

Богданов Евгений Петрович<sup>2</sup>,  
epbogdanov@mail.ru

Рикконен Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
rikk2@yandex.ru

<sup>1</sup> Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью определения уровня акустической энергии ультразвукового излучения, проходящего через многослойную конструкцию. Знание уровня акустической энергии актуально для проектирования ультразвуковых установок по изменению реологических свойств углеводородных топлив при эксплуатации энергетических объектов в условиях Арктики и Антарктики.

**Цель** состоит в разработке математической модели распространения ультразвукового излучения в многослойной системе с определением энергии в каждом слое при учете конструкции ультразвукового излучателя резонансного типа.

**Объекты:** ультразвуковой излучатель резонансного типа, многослойная система, физическая модель системы «ультразвуковой излучатель – многослойная система».

**Методы:** математическое моделирование распространения ультразвукового излучения в многослойной системе, учитывающее влияние: конструкции ультразвукового излучателя резонансного типа, его режима работы, количество слоев и механические свойства материалов многослойной системы; экспериментальные исследования на основе физической модели системы «ультразвуковой излучатель – многослойная система»; верификация математической модели на основе полученных экспериментальных данных.

**Результаты.** Разработанная математическая модель позволяет определить энергию и частотные характеристики акустического излучения в каждом слое многослойной системы. Знание уровня акустической энергии при дальнейших исследованиях позволит определить изменения реологических свойств среды, в том числе и от нагрева. Проведены экспериментальные исследования работы ультразвукового излучателя резонансного типа при нагрузке в виде одного слоя полиметилметакрилата, двух слоев полиметилметакрилата и трех слоев полиметилметакрилата. Расчетные данные согласуются с экспериментальными, погрешность не превышает 15 %.

**Выводы.** Разработанная математическая модель позволяет спроектировать конструкцию ультразвукового излучателя резонансного типа и подобрать по мощности и диапазону частот необходимый источник питания для лабораторных исследований углеводородного сырья.

### Ключевые слова:

излучатель, энергия излучения, интенсивность излучения, стоячие волны, отраженные волны, интерференционная картина, частотные характеристики, многослойная система.

### Введение

Устройства, выполненные на основе ультразвуковых (УЗ) технологий, могут вполне конкурировать в передаче энергии с другими неконтактными способами воздействия на твердые тела, такими как электромагнитные и электростатические устройства. Устройства, основанные на акустической передаче энергии, позволяют совершать определенную работу (сварку, полимеризацию, плавление, изменение реологических свойств углеводородных сред: изменения вязкости, температуры кипения, температуры застывания, изменения времени тиксотропии) в определенном (замкнутом) пространстве на расстоянии от излучателя [1–5].

Наличие надмолекулярной структуры углеводородных жидкостей вызывает ряд проблем, возникающих в процессе добычи, перекачки и переработки данного сырья. Для перечисленных технологических

процессов это выражается в изменении реологических свойств: высокой вязкости, высокой (положительной) температуре застывания и отложения парафина на оборудовании и трубопроводе. В настоящее время применяют ряд методов для подготовки высоковязкой нефти к транспорту: термический, химический и метод физических воздействий. На сегодняшний день физические методы находят все более широкое применение в нефтяной промышленности из-за их эффективности, экономичности и доступности [1–5]. Одним из физических методов является метод ультразвукового воздействия на углеводородное сырье. Теме воздействия ультразвука на углеводородные среды посвящено достаточно много научно-технических работ [1–10]. В этих работах показано влияние УЗ на реологические свойства углеводородной среды. Эффект воздействия ультразвука связан с уровнем акустической энергии, переданной в среду.

Для проектирования конкретных устройств, предназначенных для подготовки нефти и углеводородных топлив к транспорту, подготовки топлив к сжиганию, подготовки масел к эксплуатации в условиях Арктики и Антарктики, требуется знать уровни акустической энергии во всех элементах рассматриваемой конструкции. Обычно влияние УЗ излучения на нефть и нефтепродукты изучают и дают рекомендации по проектированию УЗ устройств по результатам лабораторных исследований. Исследуемая нефть в лабораторных условиях находится в многослойных кюветах из оргстекла. Эти исследования для разных углеводородных сред носят сравнительный характер и не позволяют определять действительную энергию, сообщенную в многослойную среду, является актуальной задачей.

Целью исследования является разработка математической модели распространения ультразвукового излучения в многослойной системе с определением энергии излучения в каждом слое (оргстекла, углеводородной среды, стали, разнообразных покрытий и т. д.) при учете конструкции УЗ излучателя резонансного типа.

Расчет энергии излучения, сконцентрированной в слое углеводородной среды, позволит в дальнейшем определиться с такими физическими процессами в среде, как: скорость акустического течения; акустическая кавитация и нагрев среды с изменением её реологических свойств [1–5].

#### **Разработка математической модели распространения ультразвукового излучения в многослойной системе**

Для проектирования ультразвуковых систем необходимо учитывать волновую картину процесса передачи энергии, зависящую от соотношения длины волны и толщины слоя сплошной среды, в которой распространяется звуковая энергия. Также необходимо учитывать соотношение диаметра излучателя и длины волны для определения диаграммы направленности устройства. Важным моментом является поглощение энергии в среде, которое существенно изменяет интерференционную картину процесса передачи энергии. При близких значениях длины волны и толщины слоя материала волновая (интерференционная) картина усложняется [7, 11–14]. Учет интерференционных процессов и процесса поглощения в многослойной системе вызывает существенные трудности при расчете режимов передачи энергии от источника энергии в конкретный слой многослойной системы.

В связи с этим для математического моделирования многослойной системы принят ряд допущений:

- в соответствии с [15] торец толкателя УЗ излучателя может быть представлен в виде простейшего поршня излучения, то есть когда на плоскости контакта задано равномерное распределение давления или скорость частиц без учета отраженных волн на излучатель. При этом допущении взаимодействие УЗ излучателя резонансного типа и многослойной системы можно рассматривать в одномерном виде;

- распространение акустической энергии происходит по оси толкателя УЗ излучателя, круговая форма и наличие лепестков диаграммы направленности не учитываются;
- источник энергии является источником бесконечной мощности;
- физическая картина соответствует представлению слоя сосредоточенными параметрами, поэтому поглощение и интенсивность относятся ко всему слою;
- переходные процессы не рассматриваются;
- входной электрический сигнал представляет собой синусоиду, и все расчетные переменные носят синусоидальный характер на всех частотах;
- в результате расчетов получаются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ускорения и интенсивности излучения в слоях системы без учета вторичных отраженных волн в слоях;
- рассматривается случай жесткого соединения поверхности излучателя и поверхности многослойной системы, ударные взаимодействия этих поверхностей исключены;
- излучатель совершает перемещения, равные единицам нанометров, поэтому в модели принято допущение, что материалы контактирующих элементов деформируются в зоне упругости и изменение напряженно-деформированного состояния в зоне контакта излучателя и толкателя не учитывается.

Представление акустического излучения в одномерной форме в виде плоской волны в пространстве при перечисленных допущениях позволяет представить УЗ излучатель и многослойную «нагрузку» в виде обобщенной одномерной колебательной системы [6, 11–14, 16, 17].

В этом случае для анализа акустической энергии применимы основные принципы работы энергетических систем:

- все элементы акустической системы представляют собой единую систему и охвачены единым режимом работы, рассмотрение системы по частям вносит в решение существенные погрешности в вычислениях;
- строгое соблюдение энергетического баланса (выработанная энергия равна сумме работы в намеченной точке пространства плюс все потери при передаче и преобразовании энергии).

На рис. 1 представлен УЗ излучатель резонансного типа на основе многослойного пьезоактюатора АПМ 2-7. УЗ излучатель резонансного типа состоит из: корпуса УЗ излучателя – 1; винта – 2 и гайки – 3 предварительного поджатия; центраторов – 4, 9; стальной щеки – 5; многослойного пьезоактюатора – 6; смотровых окон – 7 в корпусе УЗ излучателя; датчика силы – 8; толкателя – 10; упругости – 11.

Разработанная одномерная математическая модель позволяет смоделировать передачу акустической энергии от ультразвукового излучателя резонансного типа в многослойную систему.

Данная математическая модель описывает УЗ излучатель резонансного типа в работе на многослойную систему.

Модель позволяет учитывать следующие колебательные процессы:

- колебания подсистемы «толкатель–упругость»;
- колебания подсистемы «корпус – упругость корпуса»;
- колебания подсистемы многослойного пьезоактюатора;
- распространение ультразвука в слоях с учетом интерференционной картины и поглощения в слоях.

Амплитуда колебаний толкателя УЗ излучателя определяется суммарным импедансом устройства с учетом нагрузки в точке контакта. Далее энергия распространяется волновым процессом через элементы конструкции с учетом плотности и скорости звука конкретного слоя, длины волны и толщины слоя.

Толкатель, упругость и упругое полупространство нагрузки образуют колебательную подсистему «толкатель–упругость».

В модели необходимо учитывать колебания подсистемы «корпус – упругость корпуса», потому что амплитуда колебаний толкателя соизмерима с деформацией корпуса УЗ излучателя, следовательно, колебания части массы корпуса на жесткости конструкции корпуса необходимо учитывать в колебательном процессе.

Пьезоактюатор состоит из нескольких пьезоэлементов. Каждый пьезоэлемент имеет массу и упругость, и поэтому пьезоактюатор с точки зрения теории колебаний является сложным элементом.

С учетом этих особенностей УЗ излучатель создает колебательный процесс, который выражается в виде амплитуды колебаний и амплитуды ускорений колебаний толкателя. Далее колебательная энергия в многослойном упругом полупространстве (многослойная система) представляется как поток мощности.

Колебания толкателя УЗ излучателя резонансного типа определяются вязкоупругими свойствами колебательной системы излучателя с учетом нагрузки. Зона контакта толкателя УЗ излучателя с упругим полупространством описывается параметрами: упругость материала полупространства  $c_n$ , присоединенная мас-

са  $m_n$ , коэффициент диссипации  $r_n$  [1–5, 8, 11, 14, 18]. Зона контакта обозначена красным цветом на рис. 1.

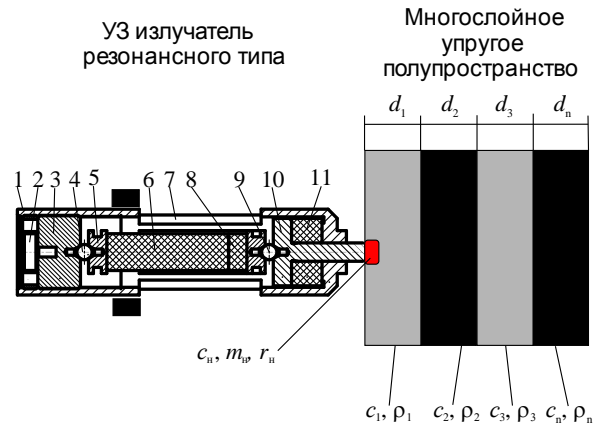


Рис. 1. Схема взаимодействия УЗ излучателя и многослойного упругого полупространства

Fig. 1. Scheme of interaction between an ultrasonic emitter and a multilayer elastic half-space

Колебания толкателя УЗ излучателя создают волновой фронт в многослойной среде. При условии строго направленного излучения по основной оси диаграммы направленности этот фронт можно представить плоской волной [1–5, 9–14, 16–19]. Одномерные волны – это волны, в которых все характеристики зависят от времени и одной координаты. От УЗ излучателя энергия распространяется в виде упругих волн в многослойной системе. При допущении малости отраженных волн в первом слое УЗ излучатель можно представить как одномерную колебательную систему в виде электрической схемы замещения (рис. 2) [1–7, 19–22]. На рис. 2 приведена электрическая схема замещения акустической системы УЗ излучателя резонансного типа с учетом пьезоактюатора АПМ-2-7, упругости, упругой деформации корпуса УЗ излучателя, акустической нагрузки и излучения в многослойную систему [1–5, 13]. Подобная, но бесконтактная система представлена в работе [1].

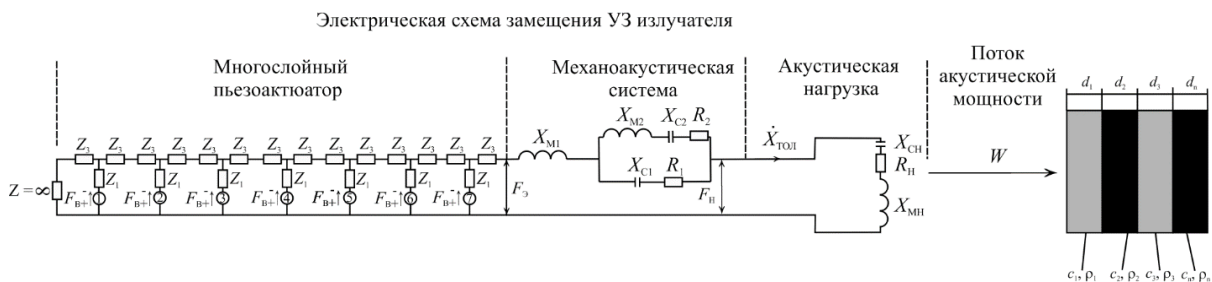


Рис. 2. Электрическая схема замещения УЗ излучателя резонансного типа

Fig. 2. Electrical scheme for ultrasonic resonant emitter substitution

В бегущей плоской волне модуль вектора мгновенного значения потока мощности  $W_i$  равен [5–7]:

$$W_i = PV = \frac{1}{\rho c} P^2 = \rho c V^2 = \rho c \omega^2 A^2, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где  $P$  – давление (Па);  $V$  – скорость среды (м/с);  $\rho$  – плотность среды (кг/м<sup>3</sup>);  $c$  – фазовая скорость волны

(м/с);  $\omega$  – угловая частота (1/с);  $A_i$  – мгновенная амплитуда колебаний среды (м). Для удобства расчета энергии в слоях колебания толкателя УЗ излучателя с конечной площадью условно переносятся на условный метр квадратный. Исходя из формулы (1), можно получить описание бегущей волны.

Фронты гармонических бегущих волн – это поверхности равных фаз, которые описываются функцией:

$$W_i = p_m \cos(\omega t - \varepsilon) \dot{X}_m \cos(\omega t - \varepsilon - \varphi) = \frac{1}{2} p_m \dot{X}_m [\cos \varphi + \cos(2\omega t - 2\varepsilon - \varphi)]. \quad (2)$$

Первое слагаемое в (2) дает постоянный поток мощности, производящий накапливающуюся с течением времени работу, второе слагаемое даёт в среднем за период по времени нуль. Данное положение вполне согласуется с работой [8].

Произведение  $1/2 p_m \dot{X}_m$  обычно называют полной мощностью системы. В этом случае удобно принять, что полная мощность состоит из двух составляющих – активной и реактивной мощностей:

- активная мощность процесса

$$W_a = \frac{1}{2} p_m \dot{X}_m \cos \varphi,$$

- реактивная мощность

$$W_r = \frac{1}{2} p_m \dot{X}_m \cos(2\omega t - 2\varepsilon - \varphi).$$

Для определения плотности потока энергии волны используется вектор Умова  $P$ , направленный в сторону распространения волны (т. е. перпендикулярно волновой поверхности), величина которого равна произведению объемной плотности энергии  $W$  и скорости распространения волны  $c$ .

Средняя интенсивность волны [1–5, 8] равна среднему значению модуля вектора Умова и определяется из выражения (3):

$$\bar{I} = \langle P \rangle = \langle W_i \rangle \times c, \quad (3)$$

где  $\langle P \rangle$  – среднее значение модуля вектора Умова;  $\langle W_i \rangle$  – среднее значение мгновенной полной звуковой мощности;  $c$  – фазовая скорость.

Средняя интенсивность для плоской волны равна [1, 6, 7]:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} c \rho \omega^2 A^2, \text{ Вт/м}^2. \quad (4)$$

Средняя интенсивность звуковой волны по формуле (4) определяется как средний поток энергии через единицу площади волнового фронта в единицу времени. Если взять единичную площадь волнового фронта, которая полностью поглощала бы звук, и расположить её перпендикулярно направлению распространения волны, то интенсивность звука равна акустической энергии, поглощаемой за одну секунду [1, 6, 7, 11]. Размерность интенсивности совпадает с размерностью потока мощности. Интенсивность звука представляет собой активную составляющую удельной мощности звуковых колебаний. Реактивная составляющая мощности колебаний непрерывно колеблется в звуковом поле то в сторону распространения волны, то в обратную сторону. За период колебаний реактивная мощность равна 0. Эта часть мощности представляет собой запас энергии в звуковом поле, аналогичный запасу энергии в электрическом и магнитном полях электрического тока [1].

Для правильного понимания полной картины звукового поля и учета соотношения длины волны и толщины слоя необходимо учитывать все составляющие уравнения (1). Вектор Умова в диссипативной колебательной системе можно представить в виде, который будет зависеть от двойной фазы колебаний. Принимая во внимание (4), получается:

$$P_i = I_0 e^{i(\omega t - kx)} e^{i(\omega t - kx + \varphi)}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5)$$

где  $P_i$  – мгновенное значение вектора Умова в слое;  $I_0 = \dot{X}^2 p_0 c_0$  – амплитуда вектора Умова излучателя;  $k$  – волновое число;  $x$  – толщина слоя.

Рассмотрена задача распространения плоских волн в слоистой среде, образованной параллельными друг другу слоями вещества, имеющая важное значение для понимания проблемы прохождения звука [1]. Задача, в соответствии с (5), решается с учетом отраженных волн в слоях, но без учета полной интерференционной картины и поглощения звуковой энергии в слоистой среде. Имеется пятислойная акустическая конструкция (рис. 2), в которой  $c_i p_i$  – волновое сопротивление слоя;  $A_i$  – амплитуда колебаний падающих волн;  $B_i$  – амплитуда колебаний отраженных волн;  $k_i$  – волновое число слоя;  $d_i$  – толщина слоя.

Параметры материалов слоев при математическом моделировании и проведении экспериментов представлены в таблице.

Решение единой акустической системы УЗ излучателя при работе на многослойную конструкцию проводилось численным методом в пакете прикладных программ *Mathcad*.

Средняя интенсивность излучения  $\bar{I}_i$ , идущая от толкателя УЗ излучателя, будет зависеть от амплитуды колебаний толкателя ( $X_{\text{тол}}$ ) и от волновых свойств рабочей среды [1, 3–5, 11, 14]:

$$\bar{I}_i = \frac{\rho_i \cdot c_i \cdot X_{\text{тол}}^2 \cdot \omega_i^2}{2}, \text{ Вт/м}^2. \quad (6)$$

**Таблица.** Параметры материалов слоев

**Table.** Layer material options

Индекс Index	Материал Material	Плотность Density $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> /kg/m <sup>3</sup>	Скорость звука в материале $c$ , м/с Acoustic speed $c$ , m/s
1	Полиметилметакрилат Plexiglass	1,2·10 <sup>3</sup>	2,71·10 <sup>3</sup>
2	Воздух/Air	1,205	330
3	Полиметилметакрилат Plexiglass	1,2·10 <sup>3</sup>	2,71·10 <sup>3</sup>
4	Воздух/Air	1,205	330
5	Полиметилметакрилат Plexiglass	1,2·10 <sup>3</sup>	2,71·10 <sup>3</sup>

Рассчитывая вектор Умова по системе уравнений распространения волны в слоях, можно определить смещение и ускорение среды в каждом слое системы [1]. Смещение среды в конкретном слое по формуле (6) определяется по формуле:

$$X_i(\omega_{i+1}) = \sqrt{\frac{2 \cdot \bar{I}_i(\omega_{i+1})}{\omega_{i+1}^2 \cdot \rho_i \cdot c_i}}, \quad (7)$$

где  $\bar{I}_i(\omega_{i+1})$  – средняя интенсивность излучения волны в  $i$  слое.

Ускорение поверхности  $i$  слоя определяется по формуле:

$$\ddot{X}_{i(i+1)} = X_i(\omega_{i+1}) \cdot \omega_{i+1}^2. \quad (8)$$

Операции по формулам (6)–(8) можно проводить только символическим методом, когда система является линейной, сигналы ускорения, скорости и смещения носят синусоидальный характер. Именно на основном резонансе замечается максимальное приближение этих сигналов к синусоиде, поэтому только на основном резонансе такая обработка сигналов правомерна.

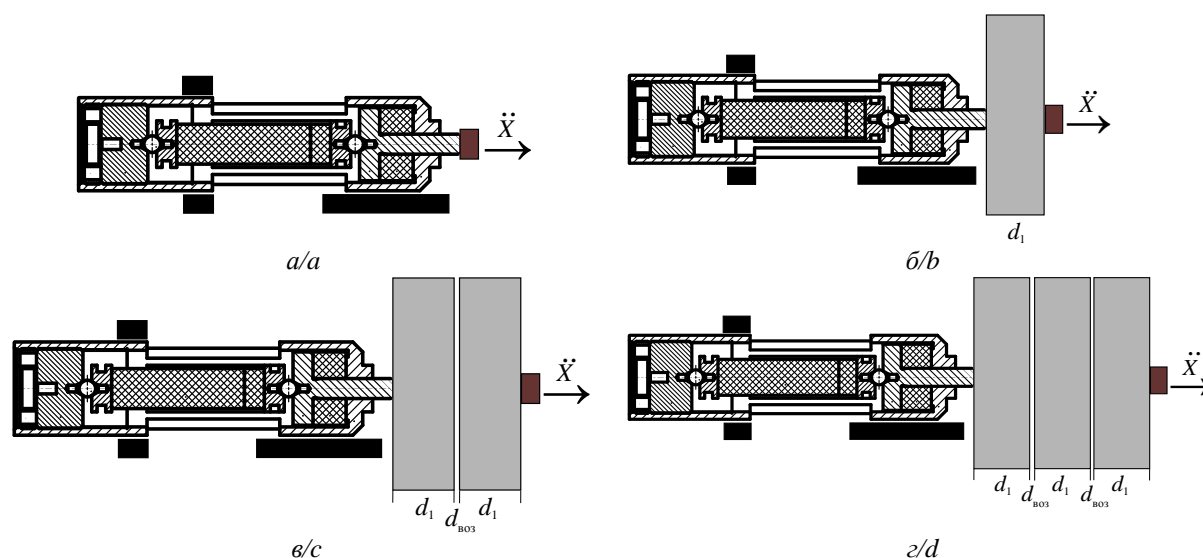


Рис. 3. Виды акустических систем: а) режим КЗ; б) нагрузка в виде одного слоя ПММА; в) нагрузка в виде двух слоев ПММА; г) нагрузка в виде трех слоев ПММА

Fig. 3. Types of acoustic systems: a) short circuit mode; b) one layer; c) two layers; d) three layers

Для верификации предложенной математической модели проведены исследования на экспериментальном стенде. Комплектация стенда и порядок проведения эксперимента подробно описаны в [5].

АЧХ нормальных акустических волн характеризуются наличием некоторого количества мод, которые определяются соотношением толщины слоя к длине волны [1, 10, 20–22]. Важной информацией для анализа структуры УЗ излучателя резонансного типа является получение АЧХ ускорения УЗ излучателя резонансного типа при работе в режиме короткого замыкания (КЗ) (без многослойной системы). В этом случае акселерометр устанавливается на торце толкателя, а АЧХ снимается в частотном диапазоне с явным проявлением резонансных явлений – максимальная амплитуда сигнала ускорения, форма сигнала ускорения близка к синусоиде [3]. На рис. 4 представлены результаты численного расчета по предложенной математической модели в сравнении с полученными экспериментальными данными. На рис. 4, а приведены результаты моделирования колебательной системы УЗ излучателя резонансного типа с учетом зоны контакта толкателя с поверхностью в сравнении

### Верификация математической модели

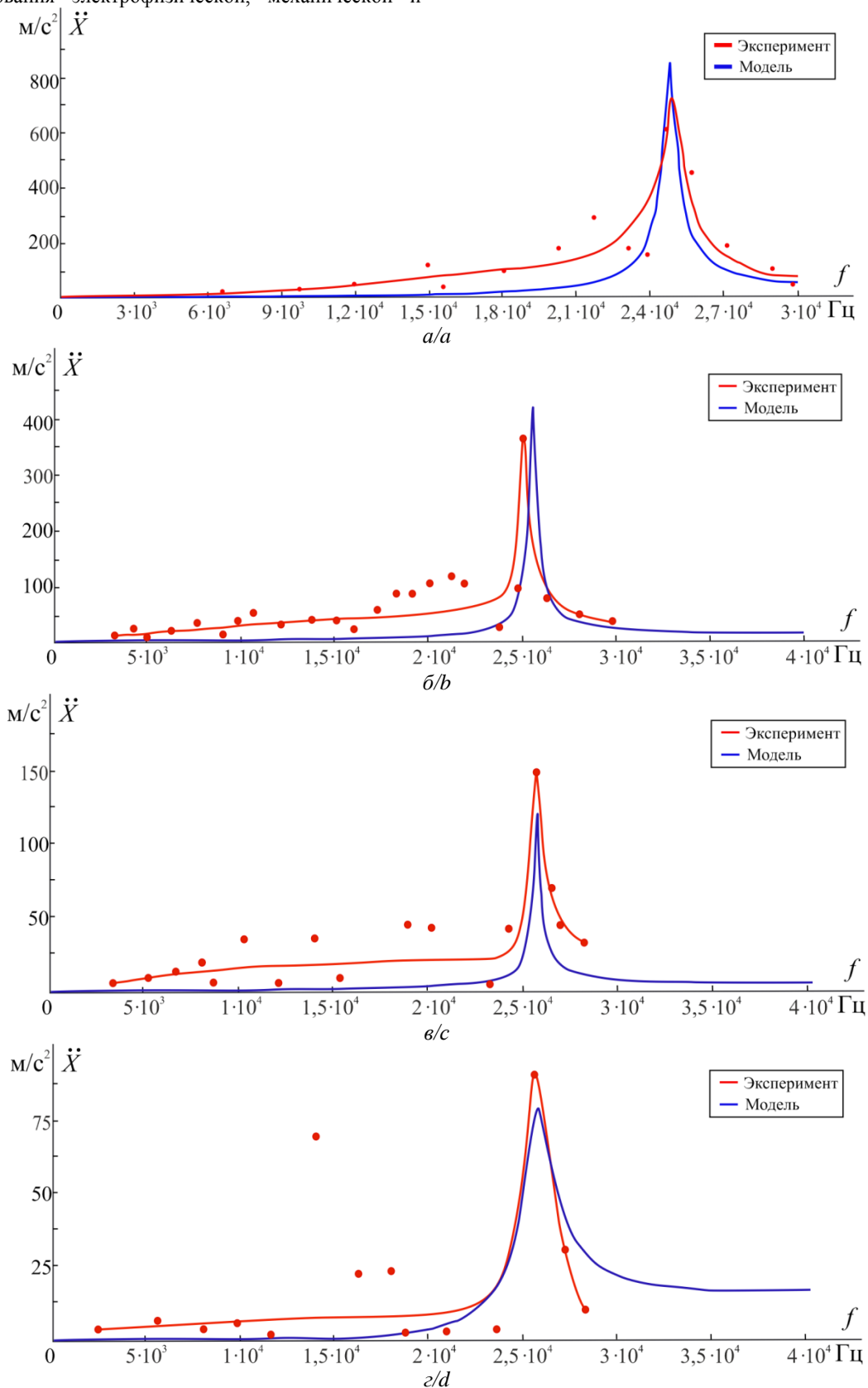
В разделе представлены результаты моделирования в виде АЧХ ускорения и средней интенсивности в слоях акустической системы в сравнении с экспериментальными данными для разных конструкций акустических систем: работа УЗ излучателя без нагрузки (режим КЗ, данные из [3]), нагрузка в виде одного слоя полиметилметакрилата (ПММА), нагрузка в виде двух слоев ПММА, нагрузка в виде трех слоев ПММА (рис. 3). Толщина слоя ПММА  $d_1$  составляла 1 мм, толщина воздушной прослойки  $d_{\text{воз}}$  составляла 0,1 мм.

с экспериментальными данными при работе УЗ излучателя резонансного типа в режиме КЗ из источника [3]. Результаты моделирования согласуются с полученными экспериментальными данными, погрешность составляет не более 15 %. Резонанс системы зафиксирован на 25,5 кГц.

На экспериментальной характеристике, в случае нагрузки в виде трех слоев ПММА, появляется увеличение сигнала ускорения на частоте 13 кГц. Это можно отнести к ошибкам обработки сигнала, так как на этой частоте форма сигнала не синусоидальная (полное преобразование невозможно). На частоте основного резонанса 25,5 кГц сигнал ускорения близок к синусоидальному виду, и в этом случае можно говорить о полном преобразовании энергии.

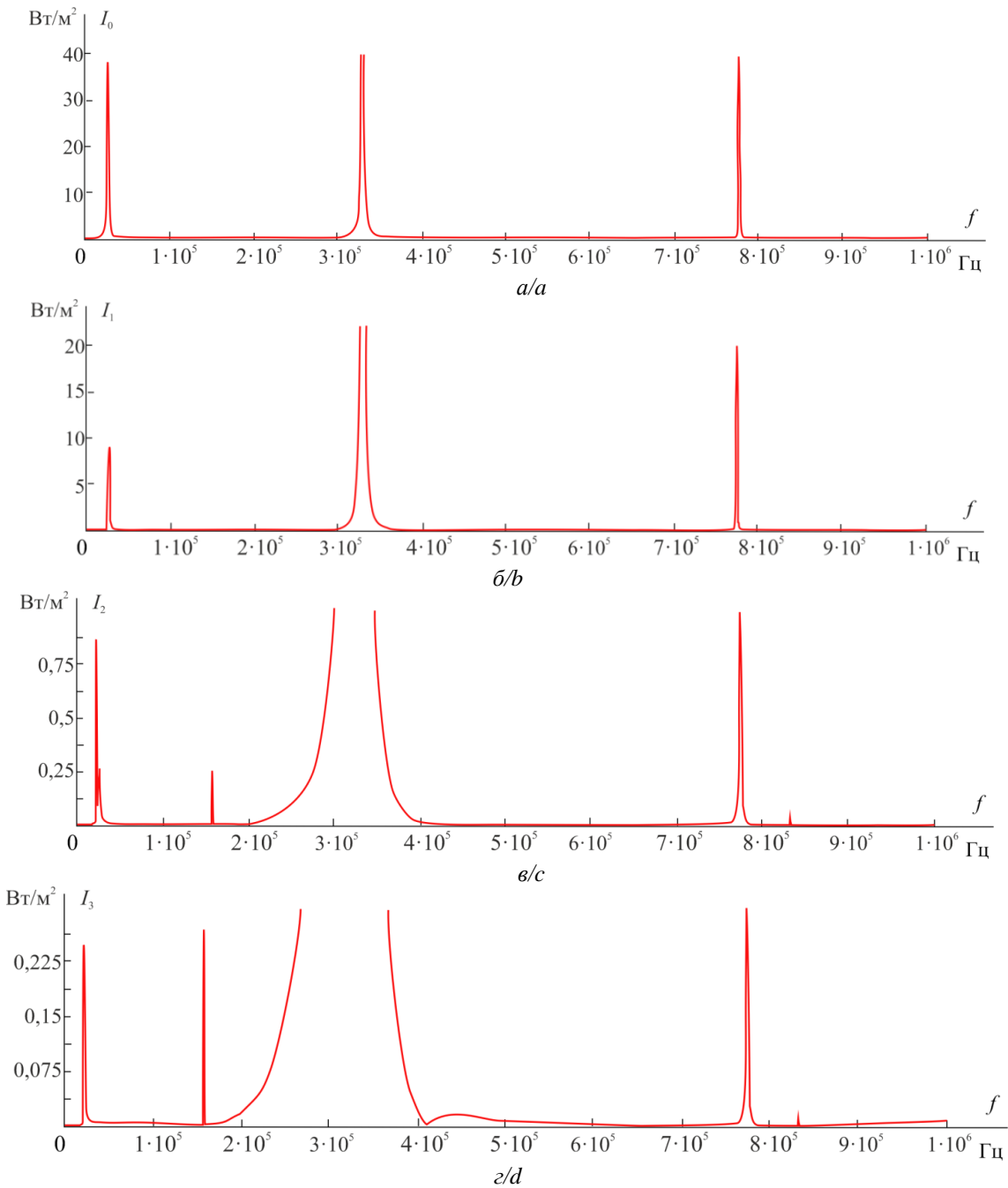
Анализ результатов моделирования АЧХ интенсивности излучения на границе каждого слоя ПММА, которые приведены на рис. 5, показал, что в рассматриваемых системах присутствуют высокочастотные моды, которые по энергетике могут существенно превышать первые по частоте резонансы. То есть для существенного увеличения коэффициента преобразования энергии необходимо использовать соответ-

ствующие источники питания и пьезоактуаторы для согласования электрофизической, механической и акустической частей колебательной системы.



**Рис. 4.** АЧХ ускорения УЗ излучателя резонансного типа, сравнение данных расчета и эксперимента для случая: а) колебательная система УЗ излучателя с учетом зоны контакта толкателя УЗ излучателя с поверхностью слоя; б) один слой; в) два слоя; г) три слоя

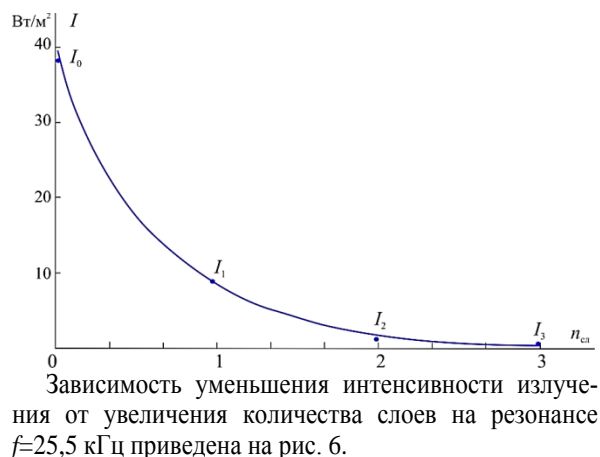
**Fig. 4.** Amplitude-frequency characteristics of acceleration of ultrasonic resonant emitter, comparison of simulation and experiment data: a) one layer, zone of contact between the ultrasonic emitter pusher and the layer surface; b) one layer; c) two layers; d) three layers



**Рис. 5.** АЧХ интенсивности излучения УЗ излучателя резонансного типа для случая: а) зона контакта толкателя УЗ излучателя с поверхностью слоя; б) один слой; в) два слоя; г) три слоя

**Fig. 5.** Amplitude-frequency characteristics of radiation intensity of ultrasonic emitter: a) zone of contact between the ultrasonic emitter pusher and the layer surface; b) one layer; c) two layers; d) three layers





**Рис. 6.** Зависимость уменьшения интенсивности излучения от увеличения количества слоев при резонансе  $f=25,5$  кГц

**Fig. 6.** Dependence of the decrease in radiation intensity on the increase in the number of layers at resonance  $f=25,5$  kHz

#### Заключение

Для определения уровня акустической энергии в каждом слое многослойной системы в работе предложена математическая модель распространения ультразвукового излучения в многослойной системе, учитывающая конструкцию ультразвукового излучателя резонансного типа, интерференционную картину поля и поглощение излучения в слоях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование процесса ультразвуковой подготовки высоковязкой нефти к транспорту / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.А. Пономарев, Н.Н. Марицкий, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 114–122.
2. Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В. Влияние условий низкочастотного акустического воздействия на стабильность водонефтяных эмульсий нефти Игнялинского месторождения // Химия в интересах устойчивого развития. – 2020. – Т. 28. – № 3. – С. 266–272. DOI: 10.15372/ChUR20202228.
3. Математическое моделирование ультразвукового излучателя резонансного типа для подготовки высоковязкой нефти к транспорту / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.А. Пономарев, Н.Н. Марицкий, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 161–169.
4. Intensification of the processes of preparation of drilling and cement mortars using vibration jet activation methods / S.V. Rikkonen, M.A. Dmitrieva, V.N. Leitsin, S.V. Ponomarev, A.V. Azin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – V. 911. – № 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/911/1/012001.
5. Способ виброструйной гидродинамической технологии сохранения текучести углеводородных топлив и нефтепродуктов в условиях низких температур / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 158–177.
6. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов,

Разработанная математическая модель позволяет проектировать конструкцию акустической системы: общую конструкцию системы, конструкцию излучателя, материалы элементов конструкции, размеры слоев, частоту и амплитуду воздействий звукового излучения на конкретный слой, мощность и частотный диапазон УЗ излучения.

Анализ результатов моделирования показал, что основной характер амплитудно-частотных характеристик рассмотренных случаев согласуется с амплитудно-частотными характеристиками ускорения ультразвукового излучателя резонансного типа при работе в режиме короткого замыкания. Амплитудно-частотные характеристики интенсивности излучения показывают, что в системе присутствуют высокочастотные моды, которые по энергетике могут существенно превышать первый по частоте резонанс. Имея соответствующие источники питания и пьезоактуаторы, можно согласовать электрофизическую, механическую и акустическую части колебательной системы для существенного увеличения коэффициента преобразования энергии излучения.

Экспериментальные данные по амплитудно-частотным характеристикам ускорения ультразвукового излучателя резонансного типа качественно подобны, имеют главный резонанс в районе 25,5 кГц и уменьшение амплитуды ускорения с ростом числа слоев ПММА. Результаты моделирования согласуются с полученными экспериментальными данными, погрешность не превышает 15 %.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0036).*

- В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
7. Резонансные колебания с предельной амплитудой в вибрационном электромагнитном активаторе / А.Н. Гаврилин, Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 201–213.
8. Гусев В.А., Руденко О.В. Поля радиационных сил и акустические течения в жидком слое на твердом полупространстве // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65. – № 2. – С. 166–181.
9. Guz A.N., Bagno A.M. Effect of prestresses on the dispersion of Lamb waves in a system consisting of a viscous liquid layer and a compressible elastic layer // International applied mechanics. – 2018. – V. 54 (3). – P. 249–258.
10. Huang L., Liang J., Wu C. A three-dimensional indirect boundary integral equation method for modeling elastic wave scattering in a layered half-space // Int. J. Solids Structures. – 2019. – V. 169. – P. 81–94.
11. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Пер. с франц. Под ред. В.В. Леманова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 424 с.
12. Создание эталонной плоской волны ультразвуковой волны в жидкости с помощью плоского пьезоэлектрического преобразователя большого волнового размера / А.А. Крохмаль, Д.А. Николаев, С.А. Цысарь, О.А. Сапожников // Акустический журнал. – 2020. – Т. 66. – № 5. – С. 475–488.
13. Исаев А.Е., Айвазян Ю.М., Поликарпов А.М. Проблемы исследования акустических свойств материалов методами ближнего поля // Альманах современной метрологии. – 2020. – № 1. – С. 163–196.
14. Зайцев В.В., Кузнецова И.Е. Акустические волны в тонких пьезоэлектрических пластинах. – М.: Радиотехника, 2018. – 240 с.
15. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 489 с.

16. Thin film flexible/bendable acoustic wave devices: evolution, hybridization and decoupling of multiple acoustic wave modes / R. Tao, W.B. Wang, J.T. Luo, S.A. Hasan, H. Torun, P. Canyelles-Pericas, J. Zhou, W.P. Xuan, M.D. Cooke, D. Gibson, Q. Wu, W.P. Ng, J.K. Luo, Y.Q. Fu // *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – V. 357. – P. 587–594.
17. Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides / Y.-F. Wang, T.-T. Wang, J.-P. Liu, Y.-S. Wang, V. Laude // *Composite Structures*. – 2018. – V. 206. – P. 588–593.
18. Анисимкин В.И., Воронова Н.В. Особенности генерации нормальных акустических волн высших порядков в тонких пьезоэлектрических пластинах // *Акустический журнал*. – 2020. – Т. 66. – № 1. – С. 3–7.
19. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures / X.-G. Wang, W.-L. Wu, Z.-C. Huang, J.-J. Chang, N.-X. Wu // *Materials*. – 2018. – V. 11. – № 310. DOI: 10.3390/ma11020310.
20. Falletta S., Monegato G., Scuderi L. On the discretization and application of two space–time boundary integral equations for 3D wave propagation problems in unbounded domains // *Applied Numerical Mathematics*. – 2018. – V. 124. – P. 22–43.
21. Gong Jing. Study on deacidification process of waste internal combustion engine oil under the action of ultrasound // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ.* – 2020. – V. 467. – № 012046. – 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/467/1/012046.
22. Xu Y., Langbauer C., Hofstaetter H. The application of ultrasonic technology for cleaning oil contaminated sand // *SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility Conference*. – Kuala Lumpur, 2017. – 12 p.

Поступила: 21.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 15.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Азин А.В.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета.

**Богданов Е.П.**, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Рикконен С.В.**, кандидат технических наук, доцент, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета.

UDC 534.22

## SIMULATION OF ACOUSTIC ENERGY TRANSFER THROUGH A MULTILAYER SYSTEM FOR CHANGING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF HYDROCARBONS

**Anton V. Azin<sup>1</sup>,**  
antonazin@niipmm.tsu.ru

**Eugene P. Bogdanov<sup>2</sup>,**  
epbogdanov@mail.ru

**Sergey V. Rikonen<sup>1</sup>,**  
rikk2@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance** of the research is caused by the need to determine the acoustic energy level of ultrasonic exposure propagation in a multilayer system. This is required to develop the engineering project of ultrasonic devices which would modify the hydrocarbon fuel rheological properties. This, in its turn, could further their application in energy complex facilities in the Arctic and Antarctic environments.

**Aim:** to develop a mathematical model for ultrasonic radiation propagation in a multilayer system with the determination of the energy at each resonance. Such a model would take into account the design-type of the ultrasound resonant emitter.

**Object:** design-type of the ultrasound resonant emitter, multilayer system and physical model system: «ultrasonic emitter – multilayer system».

**Methods:** mathematical modeling of ultrasonic radiation propagation within a multilayer system, considering the following impact factors: design-type of the ultrasound resonant emitter, operating mode, number of layers and material mechanical properties of the multilayer system. Experiments were based on the physical model system: «ultrasonic emitter – multilayer system». Experimental data verification proved the effectiveness of the mathematical model.

**Results.** This mathematical model enables to determine and calculate the energy and frequency characteristics of acoustic radiation in each layer within the multilayer system itself. Ultrasonic resonant emitter operating experiments under one plexiglass-layer, two plexiglass-layer and three-plexiglass layer loads have been carried out. Estimated data are in good agreement with experiments, whereas, discrepancy does not exceed 15 %.

**Conclusion.** Proposed and developed mathematical model enables the ultrasound resonant emitter-type to be designed, according to required power source capacity and frequency range. In this case, it could be applied for hydrocarbon fuel laboratory research.

### Key words:

emitter, radiation energy, radiation intensity, standing waves, reflected waves, interference pattern, frequency characteristics, multilayer system.

The work was carried out within the framework of the State mission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme 0721-2020-0036).

### REFERENCES

- Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.A., Maritsky N.N., Rikonen S.V. Mathematical modelling of high-viscous oil ultrasonic preparation for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 114–122. In Rus.
- Loskutova Yu.V., Yudina N.V. Effect of the conditions of low-frequency acoustic treatment on the stability of oil-water emulsions of oil from the Ignyalinskoye deposit. *Chemistry for Sustainable Development*, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 266–272. In Rus. DOI: 10.15372/KhUR2020228.
- Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.A., Maritsky N.N., Rikonen S.V. Mathematical modelling of high-viscous oil ultrasonic preparation for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 161–169. In Rus.
- Rikonen S.V., Dmitrieva M.A., Leitsin V.N., Ponomarev S.V., Azin A.V. Intensification of the processes of preparation of drilling and cement mortars using vibration jet activation methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 911, no. 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/911/1/012001.
- Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikonen S.V. Method of vibro-jet hydrodynamic technology to retain the fluidity of hydrocarbon fuels and petroleum products at low temperatures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 41–48. In Rus.
- Glazyrin A.S., Langraf S.V., Isaev Y.N., Filipas A.A., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Leonov A.P., Khamitov R.N., Rakov I.V., Kovalev V.Z., Kolesnikov S.V., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
- Gavrilin A.N., Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Polishchuk V.I. Resonant oscillations with a limiting amplitude in a vibration electromagnetic activator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 201–213. In Rus.
- Gusev V.A., Rudenko O.V. Radiation force fields and acoustic flows in a liquid layer on a solid half-space. *Acoustical physics*, 2019, vol. 65, no. 2, pp. 166–181. In Rus.
- Guz A.N., Bagno A.M. Effect of prestresses on the dispersion of Lamb waves in a system consisting of a viscous liquid layer and a compressible elastic layer. *International applied mechanics*, 2018, vol. 54 (3), pp. 249–258.
- Huang L., Liang J., Wu C. A three-dimensional indirect boundary integral equation method for modeling elastic wave scattering in a layered half-space. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, vol. 169, pp. 81–94.

11. Dieulesaint E., Royer D. *Uprugie volny v tverdykh telakh. Primenenie dlya obrabotki signalov* [Elastic waves in solids. Application for signal processing]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 424 p.
12. Krokhnal A.A., Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Sapozhnikov O.A. Creation of a reference plane wave of an ultrasonic wave in a liquid using a flat piezoelectric emitter of large wave size. *Acoustical physics*, 2020, vol. 66, no. 5, pp. 475–488.
13. Isaev A.E., Ayvazyan Yu.M., Polikarpov A.M. Problemy issledovaniya akusticheskikh svoystv materialov metodami blizhnego polya [Problems of studying the acoustic properties of materials by near-field methods]. *Almanac of modern metrology*, 2020, no. 1, pp. 163–196.
14. Zaytsev V.V., Kuznetsova I.E. *Akusticheskie volny v tonkikh piezoelektricheskikh plastinakh* [Acoustic waves in thin piezoelectric plates]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2018. 240 p.
15. Isakov M.A. *Obshchaya akustika* [General acoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 489 p.
16. Tao R., Wang W.B., Luo J.T., Hasan S.A., Torun H., Canyelles-Pericas P., Zhou J., Xuan W.P., Cooke M.D., Gibson D., Wu Q., Ng W.P., Luo J.K., Fu Y.Q. Thin film flexible/bendable acoustic wave devices: evolution, hybridization and decoupling of multiple acoustic wave modes. *Surface & Coatings Technology*, 2019, vol. 357, pp. 587–594.
17. Wang Y.-F., Wang T.-T., Liu J.-P., Wang Y.-S., Laude V. Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides. *Composite Structures*, 2018, vol. 206, pp. 588–593.
18. Anisimkin V.I., Voronova N.V. Features of the generation of higher-order normal acoustic waves in thin piezoelectric plates. *Acoustical physics*, 2020, vol. 66, no. 1, pp. 3–7.
19. Wang X.-G., Wu W.-L., Huang Z.-C., Chang J.-J., Wu N.-X. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 310. DOI: 10.3390/ma11020310.
20. Falleta S., Monegato G., Scuderi L. On the discretization and application of two space–time boundary integral equations for 3D wave propagation problems in unbounded domains. *Applied Numerical Mathematics*, 2018, vol. 124, pp. 22–43.
21. Gong Jing. Study on deacidification process of waste internal combustion engine oil under the action of ultrasound. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 467, no. 012046, 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/467/1/012046.
22. Xu Y., Langbauer C., Hofstaetter H. The application of ultrasonic technology for cleaning oil contaminated sand. *SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility Conference*. Kuala Lumpur, 2017. 12 p.

Received: 21 November 2022.

Reviewed: 15 February 2023.

#### Information about the authors

**Anton V. Azin**, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

**Eugene P. Bogdanov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey V. Rikkonen**, Cand. Sc., research engineer, National Research Tomsk State University.

UDC 550.8+550.84.09

## SEPARATION OF MAGNETIC ANOMALIES USING FRACTAL METHOD IN THE ESFORDI REGION FOR IRON EXPLORATION, CENTRAL EAST IRAN

Amin Karimi Kalvarzi<sup>1</sup>,  
Aref.shirazi@aut.ac.ir

Aref Shirazi<sup>1</sup>,  
Aref.shirazi@aut.ac.ir

Adel Shirazy<sup>1</sup>,  
Adel.shirazy@shahroodut.ac.ir

Amin Beiranvand Pour<sup>2</sup>,  
beiranvand.pour@umt.edu.my

Ardehshir Hezarkhani<sup>1</sup>,  
Ardehez@aut.ac.ir

Hamed Nazerian<sup>1</sup>,  
hamed.nazerian@studium.unict.it

Timofey V. Timkin<sup>3</sup>,  
timkin@tpu.ru

Valery G. Voroshilov<sup>3</sup>,  
v\_g\_v@tpu.ru

<sup>1</sup> Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic),  
Hafez avenue, 1591634311, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> University Malaysia Terengganu (UMT),  
Kuala Nerus, 21030, Terengganu, Malaysia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the possibilities of measuring the potential magnetic field, which has self-similar (fractal) properties, as well as a practical tool for prospecting and exploration of iron ores. In the Esfordi area, this method was used by us for the first time to identify, separate and interpret geophysical (magnetic) anomalies.

**The main aim** of this thematic and practical study is the qualitative interpretation of geophysical data, the application of new methods in the prospecting and exploration of mineral deposits, modeling the geological environment and forecasting new promising areas.

**Object:** Esfordi region, Yazd province, Iran.

**Methods.** To obtain additional information about the subsurface, magnetometric data were used with their interpretation by the RTP (reduction to the north magnetic pole) method. For modeling purposes, an artificial sample was made, consisting of a sphere, a cube and a cuboid, and it was found that the fractal method can be used to separate anomalies for unipolar models (cube and cuboid).

**Results.** The results of the study were applied to the Esfordi region, where it was found that at a survey scale of 1:100000, there is a direct relationship between the fractal method and the 3D model, which can be used to locate iron ore mineralization.

### Key words:

magnetic anomalies, fractal, RTP-area method, modeling, iron ores, Esfordi region, Iran.

### Introduction

In today's complex world, where we are witnessing advances in various technologies, especially in the mining industry, new methods and technologies in estimating the depth of anomalies during mineral exploration seem necessary [1–11]. Studies on iron ores have also been carried out in abundance in various formats [12–17], because iron is widely used in various industries such as automotive, electronics, etc. [18, 19]. To better advance, magnetic phenomena must be studied. Isolation of magnetic anomalies from the field and then an accurate determination of its model is one of the most critical parameters extracted from geophysical data interpretation [20–24]. One of the experimental methods that emerged with the advancement of technology and science was the experimental geophysical method. As its name implies, the experimental geophysical methods deal with the physics of the earth and the surrounding atmosphere. These methods are used to determine underground reserves and resources such as reservoirs of hydrocarbons and metal minerals, physical properties of the earth's layers, separate the earth's layers, and the location of geological structures. The methods used in geophysical

exploration are based on physical principles. Magnetic exploration is one of the oldest geophysical exploration methods that has been used for many years in mineral exploration and economic mineralogy, and even for archaeological purposes. This method also identifies magnetic sources between sedimentary layers such as deep igneous or volcanic intrusions. In mineral exploration, the magneto metric method is very effective for exploring both magnetic and non-magnetic minerals associated with magnetic minerals. Sedimentary rocks usually have minor magnetic effects, so changes in the intensity of the magnetic field at the earth's surface are mostly related to lithological changes in basement rocks or igneous intrusions. Minimal changes in the concentration of magnetite during the diagenesis process cause minimal anomalies. Various computational methods are widely used in data processing, an essential part of anomaly analysis. In this section, methods are used to help separate specific anomalous components. The measured magnetic field follows the principle of inhibition of anomalies from different sources. These principles are: (1) Remaining anomalies located in the study area; (2) Deep and significant geological resources

create regional components with long wave-lengths; (3) Low wavelength components created due to tracking errors and observation of shallow and small information and sources.

One of the steps in the final interpretation is removing the disturbing regional components and noises in the anomalous field from the remaining field. This principle is solved based on separating the remaining anomalies by eliminating or weakening the regional anomalies and noise [3, 4]. An important goal in interpreting potential field data is to improve the resolution of observed data. In magnetic exploration, in areas where there is a limited outcrop, by determining the lateral changes of magnetic susceptibility, information can be obtained not only about the lithological changes but also about the structural process of the area [23–26]. In potential field analysis, many algorithms are designed to extract shallow information [3, 27–29]. The method of anomaly separation from the field can be divided into two groups, which include structural (based on the spatial distribution of data) and non-structural (based on the structural distribution of data) [5, 29–33]. Classical statistics assumed that statistical parameters would lead to a normal distribution or normal log in previous years. This assumption emphasizes the frequency distribution of parameters, but spatial variability, particularly spatial correlation information, is ignored [34–37]. The difference between structural and non-structural methods is that structural methods generalize the coordinates of points and their positions. Generally, an anomaly with a small amount in the field can reduce the overall anomaly. Non-structural methods can be useful to solve some problems according to the distribution and spatial position of the sample [38], for example, we can refer to the grade-area model in the fractal method [39]. The concept of fractals to describe the modeling and analysis of complex phenomena, processes of self-testing, or scale immutability was described by Mandelbrot [40]. In the last 40 years, the concept of fractal has expanded significantly from geo-metric sets to multidimensional contexts [2, 31, 41]. In recent years, the fractal method has been introduced in earth sciences, physics, chemistry, medicine and mineral processing and has become a popular scientific topic in the scientific community [42].

So far, many algorithms have been devised to separate the anomaly from the context, in other words, to identify boundaries with different characteristics of the context. In general, the main concerns in the diagnosis of anomalies can be expressed in two cases: (1) How to identify the field; and (2) Determining the possibility of an irregular border.

Fractal and multi-fractal models are used to quantify patterns such as geophysical data. Fractal and multi-fractal modeling is widely used to differentiate various mineralization [5, 16, 17]. This method has several limitations, especially when boundary effects are involved in irregular geometric data sets [18]. The primary method used for all cases seems to be the concentration-area method, which means that geophysical distributions mainly satisfy the properties of a fractal function. There is evidence that geophysical and

geochemical data distribution has fractal behavior in nature [19, 20]. This theory develops an alternative interpretation validation and improves proper methods for the analysis of geophysical distributions.

Before using statistical methods on actual data, they are usually tested on artificial data to confirm their effect. Due to the complexity of artificial calculations, magnetic sources often replace simple geometric shapes (spheres, prisms, or cubes) that are very representative of natural geological sources [43]. Therefore, in this paper, to express the effect of the cut-area model in the fractal method on accurate data, we apply this method to an artificial sample consisting of three simple geometric shapes.

### Research methodology

The Fractals result from the self-similarity of parameters associated with scale instability and refer to the property of a system that does not change with scale change. Mandelbrot introduces fractals to describe patterns composed of parts with a geometry (shape) and are more or less similar to the general pattern regardless of scale [44, 45]. There are different models for distributing the fractal method, including number-size model [46], concentration-area model [47–50] and concentration-distance model [34]. Due to the complexity of magnetic field issues, a variety of maps have been developed by experts over the years, each of which contains some form of exploratory information. In the polarization map (RTP), due to the transfer of the anomalous location to the magnetic pole, where the earth's magnetic field becomes vertical, the effect of the geographical location of the harvest site, i. e. the angles of inclination and deflection, is eliminated. This processing causes the location of the magnetic anomaly to be corrected relative to the site of the mineralization, and in fact, the magnetic anomaly is placed on top of the deposit. Due to the nature of magnetic field vectoring and the variation in inclination angle and deflection angle concerning the magnetic equator, maximum magnetic anomalies are transmitted directly from the sources, and the anomalies are very asymmetric. This complicates the interpretation of anomalies, especially at lower latitudes [3]. Therefore, to counter this effect, Baranov proposed a method for converting magnetic anomalies at any magnetic latitude to anomalies based on the sheer magnetism and the vertical field based on the Poisson relation [22].

One of the methods based on fractal distribution is the concentration-area one. This method, proposed by Cheng and his colleagues, is based on an area that occupies a unique scale in the study area [39]. Instead of the term concentration, the term pole reversal is used in this research, and the RTP-area model, i. e. specific areas that occupy the polarized reversal levels in the study area, is investigated.

The general formula of the model proposed by Cheng and his colleagues is defined according by the equation (1):

$$A(\rho \leq \nu)\alpha\rho^{-\alpha_1}; A(\rho \geq \nu)\alpha\rho^{-\alpha_2}, \quad (1)$$

where  $\rho$  is equal to the RTP plane and  $A(\rho)$  is the area of the regions with  $\rho$  plane;  $v$  is the threshold values;  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  are the fractal dimensions [34, 44, 51–53].

This method has advantages over similar cases in classical statistics:

- (1) independence of data in the RTP-area fractal method;
- (2) consideration of the geological situation in data distribution;
- (3) independence of standard or non-normal data.

This method considers the exact spatial position of the samples to separate the anomaly from the background. In addition, there is no need to delete out-of-line data in this method because the fractal nature of the data automatically removes these items [44, 45, 54, 55].

To obtain the enclosed area, the contour map of the desired area should be prepared using software such as Surfer, Geosoft, or GIS to calculate the area of each level line [56–63]. After drawing the contour map of the data for each cell, a value is specified that represents its RTP, and each cell has its unique area. The levels are arranged in ascending order, and for each repetitive level, only one item is recorded along with its total areas in the table. After performing the calculations, the whole logarithmic diagram of the RTP area is drawn. An exponential

relationship should be observed in the diagram. The threshold values are obtained from the breakpoints in the last step, and the anomaly map is drawn based on the threshold values [30, 41, 64, 65].

#### Artificial Data

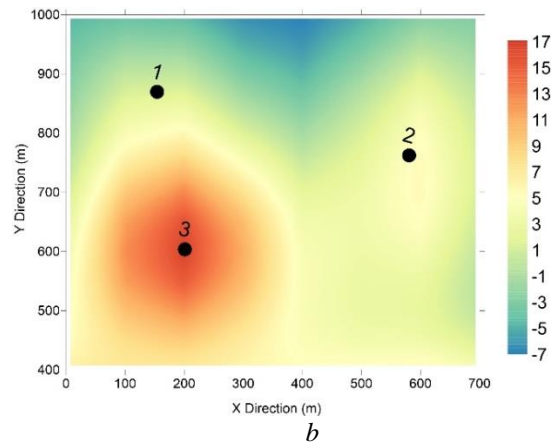
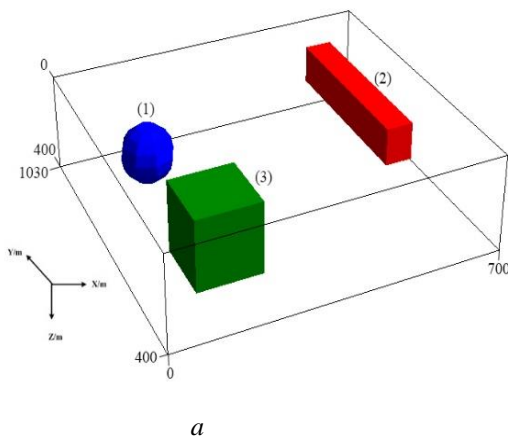
A synthetic prototype was produced by Model vision 13.0 software [47, 66, 67]. In this example, three simple geometric sources of a sphere, rectangular cube and square cube, were used. The parameters used and the coordinates of the midpoints of these three sources are shown in Table. The deflection angle and magnetic inclinations were 50 and 3 degrees, respectively, and the magnetic field strength was selected in the modeling range of 47000 nT. Fig. 1, *a* shows a three-dimensional view of the artificial specimen.

Artificial data were generated on this model with 10 in 10 networking. According to the artificial data, a general magnetic field map was created for this sample. The general magnetic field map became the pole reversal map because it does not accurately show the exact position of the magnetic field on the ground [43, 52, 68–74]; Fig. 1, *b* shows the RTP map.

**Table.** Geometric parameters of the three sources used

**Таблица.** Геометрические параметры трех используемых источников

Number Число	Source Источник	Midpoint coordinates/meter Координаты средней точки/метр	Length/Длина			Magnetic resistance Магнитное сопротивление
			X/meter X/метр	Y/meter Y/метр	Z/meter Z/метр	
1	Sphere/Сфера	(143.1,880.7,300)	60	60	60	0,03
2	Cuboid/Кубоид	(596.9,773.4,200)	60	380	75	0,02
3	Cube/Куб	(190.1,614.9,250)	150	150	150	0,03

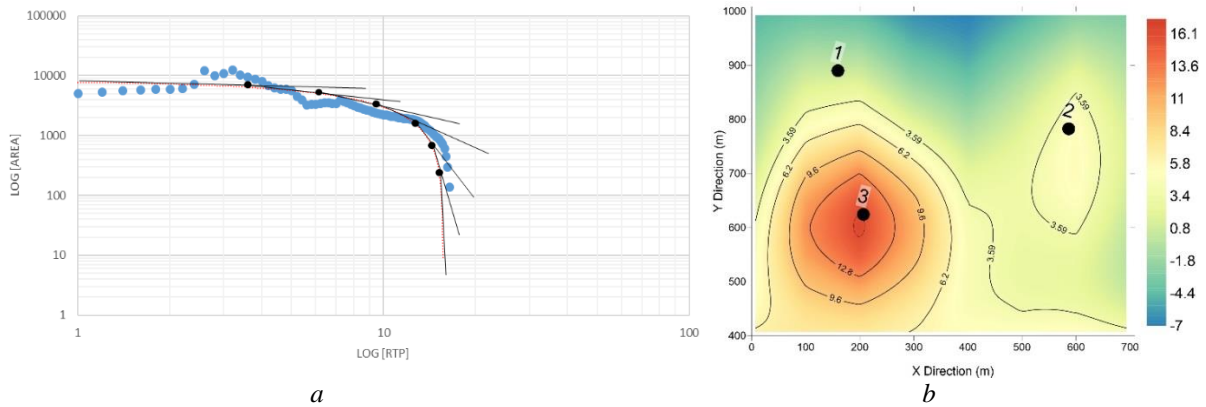


**Fig. 1.** Three-dimensional view of the sources used in the artificial model (*a*) and reversal map to the pole of the artificial model (*b*)

**Рис. 1.** Трехмерный вид источников, используемых в искусственной модели (*a*), и карта разворота к полюсу искусственной модели (*b*)

For the fractal model, we obtain the area of the levels in Fig. 1, *b*. The distance of each level in this sample was set to 0,1. Fig. 2, *a* shows an all-logarithmic RTP-area diagram for artificial data. According to the thresholds obtained from this diagram, the anomaly is separated from the field in Fig. 2, *b*. As can be seen, the desired anomaly for the square-cube source is well represented, while for the rectangular cube source, there is little

separation. Due to this anomaly in the interpretation of the spherical source is placed between the positive and negative poles. In the whole logarithmic diagram, negative data is removed, the RTP-area method alone cannot separate the boundaries of such layers. However, it is possible that in the areas where the boundaries of the layers are most prominent, they are somewhat close to the source of the square cube.

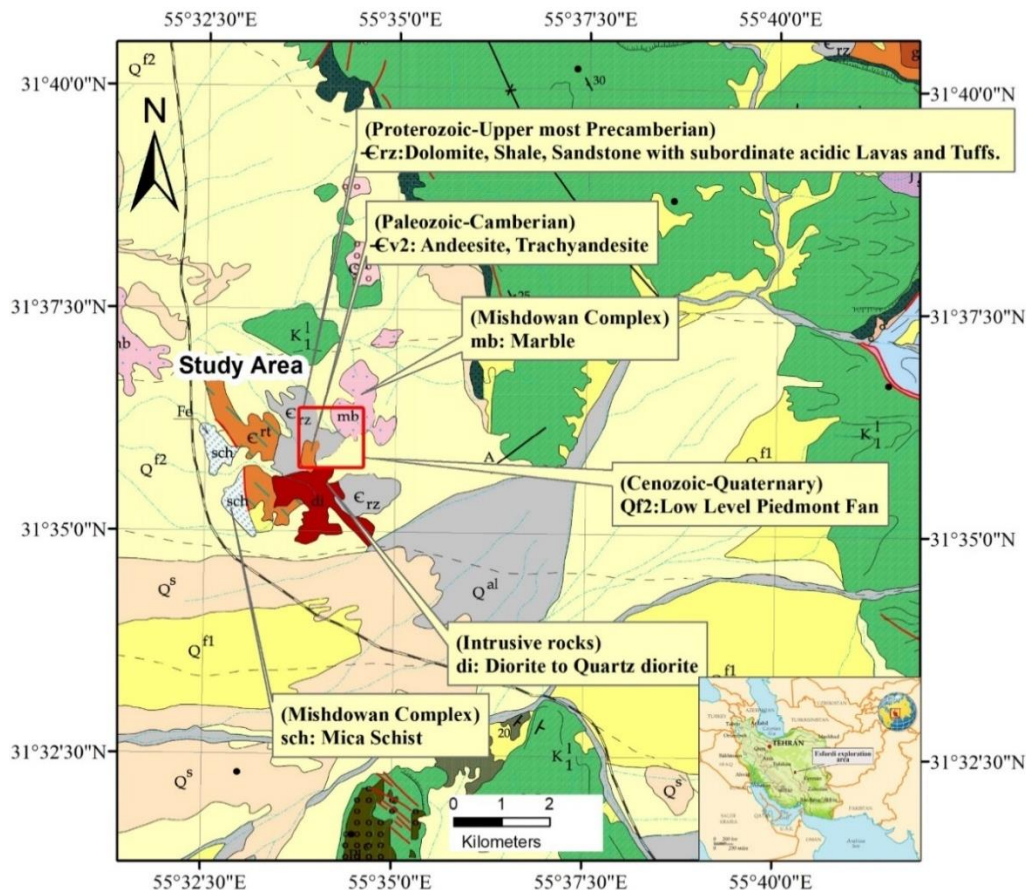


**Fig. 2.** Full logarithmic diagram of RTP-area (a) and anomaly separation map from the field on artificial data (b)  
**Рис. 2.** Полная логарифмическая диаграмма RTP-области (a) и карта разделения аномалий от поля по искусственным данным (b)

**Case study**

The study area is located on 1:100000 Esfordi in the south of Yazd province. This area is located 15 km east of Bafgh city and 14 km southwest of the Bafgh iron mine (Fig. 3). Geologically, this area contains dolomite, shale, sandstone along with tuff and acidic lavas (Fig. 4).

Iron ore is formed in the bulk, lens, and layered form in Upper Precambrian deposits, and its main minerals are magnetite, ilmenite, hematite, and to a lesser extent, pyrite. Gang apatite is present in relatively large amounts in this ore. Esfordi iron ore, black spot, Mishdovan, and Narigan ores are the most critical views of this deposit.



**Fig. 3.** Schematic geological map of the Esfordi exploration area in Central East Iran  
**Рис. 3.** Схематическая геологическая карта разведочного района Эсфорди в центрально-восточном Иране

The area in which the magnetometric survey has been carried out has an extension of about 1,5 km in the east-west direction and 1,7 km in the north-south direction. In order to interpret the magnetic data in the study area,

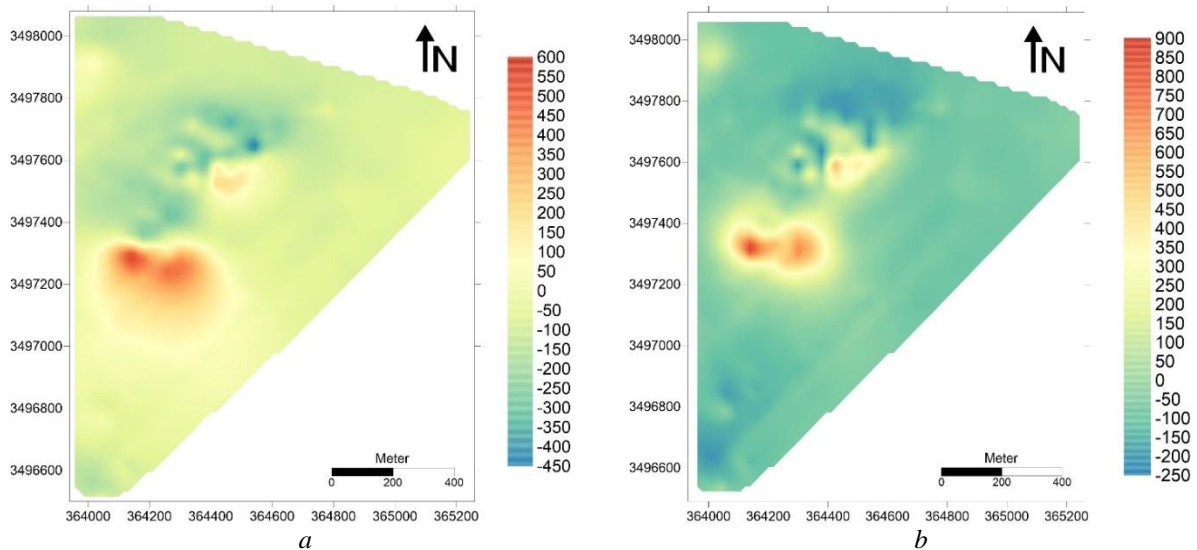
1320 points with a distance of 40 meters from the stations and 20 meters from the profiles have been taken from each other. After making the necessary corrections to the data, a map of the whole magnetic field for the desired



range was prepared (Fig. 4, a). The changes in this field result from the Earth's magnetic field and local fields due to the presence of a magnetic source in the range. In this map, two anomalies are observed, one of which is in a bipolar zone with an east-west trend.

Furthermore, another anomaly is in the center of the range, the negative pole of which is widely around and very irregular. It is important to note that the two anomalies, due to their small distance, affect the measurement of the related magnetic field. The nature of the anomalies is bipolar, and since the angle of inclination and magnetic deflection of the Earth is a function of the geographical location of the measuring points, therefore,

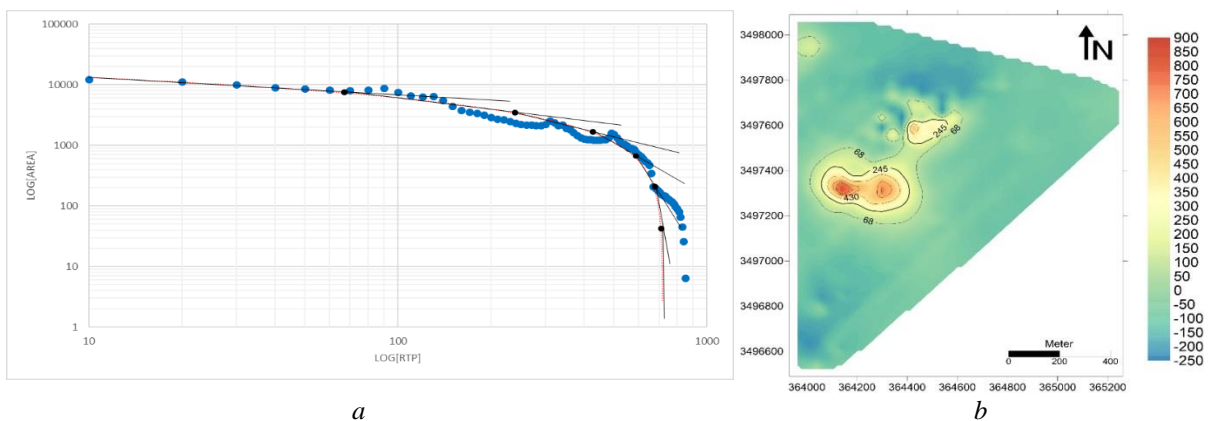
the shape of the source, in addition to magnetic susceptibility, depends on the magnetic induction of the Earth. This phenomenon is one of the factors complicating the analysis of magnetic maps. To solve this problem, a polarizing filter is used. In this case, the anomalies are located vertically above the source. As mentioned before, a pole in the desired range is prepared to show the exact position of the anomalies on the map. To prepare the reversal map to the pole in the deflection angle and magnetic inclination range, 49 and 3,3 degrees were applied on the whole magnetic field map, respectively. Fig. 4, b shows the reversal map to the pole of this range.



**Fig. 4.** Map of the total magnetic field (a) and map of return to the pole (b)  
**Рис. 4.** Карта полного магнитного поля (a) и карта разворота к полюсу (b)

The distance of the levels of the reversal map to the pole nT 1 was considered, and the area of each level was calculated. The complete logarithmic diagram of the

RTP-area was plotted according to Fig. 5, a. According to Fig. 5, b, the anomaly is isolated from the field according to the thresholds obtained from Fig. 5, a.



**Fig. 5.** Full logarithmic diagram of RTP-area (a) and anomaly separation map from the background for the study area (b)  
**Рис. 5.** Полная логарифмическая диаграмма RTP-района (a) и карта отделения аномалий от фона для изучаемой территории (b)

To obtain the depth of anomalies, the area in which the three anomalies are located was separated, and the depth was estimated. Then, depth estimates were performed for structural indicators and different window sizes, and the

results were displayed on the polarization map (Fig. 6). After the examinations, a suitable structural index of 1 and a suitable window size of 15×15 were found. This diagnosis is estimated after various surveys on the map. It

means that with different studies, this diagnosis does not contain out-of-row values and all points are on the trend of abnormalities. According to the anomaly results, A is a sloping dyke which western part is less deep than its

eastern part, which indicates that the source has a slope to the east. This anomaly in the western part of the depth is about  $10 \pm 40$  meters. The depths of anomalies B and C are also approximately 40 meters.

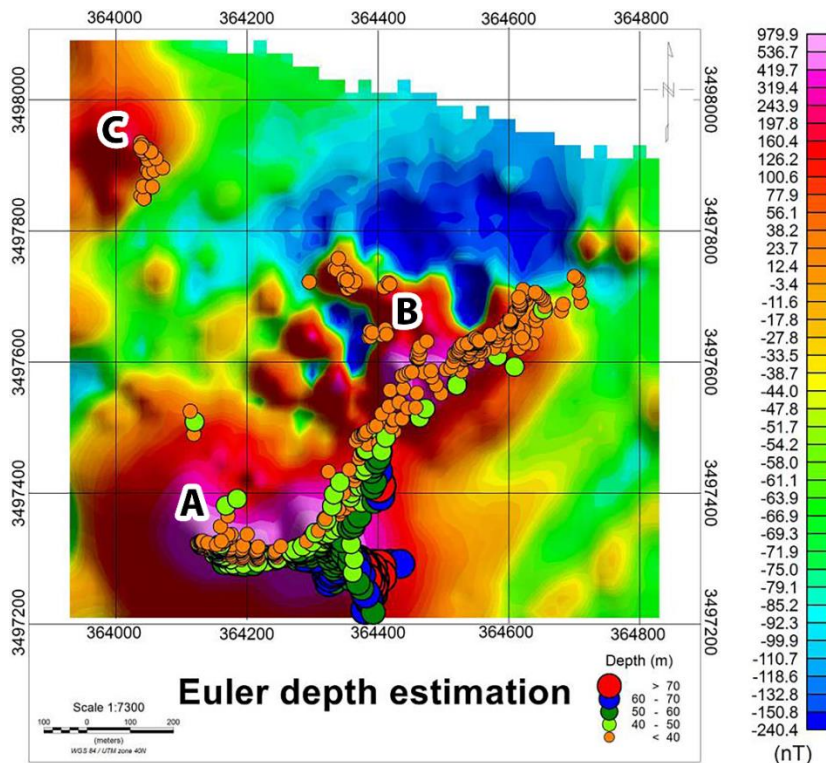


Fig. 6. Estimation of the study area depth

Рис. 6. Карта с оценкой глубины изучаемой области

Since most field studies have an inherent complexity, performing two-dimensional modeling for exploration purposes does not seem sufficient, and the need for three-dimensional modeling is well felt. Leading modeling is one of the valuable methods for modeling. Because the model parameters can be part of a proportional inverse procedure, different model parameters are created for modeling. Most of the leading models in the potential field are based on simple integral equations that can represent the magnetic distribution of the source in a polygon [43]. After estimating the approximate position and depth of the magnetic field anomaly using the residual field analysis and estimating the depth, it is possible to model the magnetic source three-dimensionally (magnetic anomaly generating mass).

The mathematical process of predicting data based on some physical or mathematical model is a specific set of model parameters, available information, and source geometry. We create an artificial model and use it to generate predicted data. One of the critical parameters for performing advanced modeling is the correct estimation of the magnetic self-susceptibility of the anomalous generating mass. The most important aspect of modeling is the simulation of horizontal gradients, which can be observed by calculating and comparing the observed horizontal derivatives and modeling them. The amplitude of the modeled anomaly can be compared by adjusting the adaptation of the magnetic contrast properties in the final stage.

In magnetometric impressions, the total composition of the magnetic field is usually measured on a horizontal plane. The purpose of the impressions is to determine the magnetization distribution of the source, estimate the depth of the source, and the direction of magnetization of the entire source. According to the uncertainty principle in field answers, the interpretive potential has difficulty achieving the above answers, and this uncertainty is induced in theoretical models. According to this principle, countless theoretical models can create similar magnetic anomalies. Minimizing the number of answers in modeling requires all available geophysical and geological information. For example, field sampling and determining the magnetic self-susceptibility of samples in the laboratory can be one way to reduce uncertainty. It should also be noted that surface samples are not closely related to deeper samples.

Reducing the effect of this principle on modeling results is possible in three ways: mathematics, geophysics, and geology. The geophysical magnetization determined by reverse modeling should not be much different from the values measured in the laboratory. From a geological point of view, it is necessary to observe the relationship between the anomaly pattern and its generative structure so that the chosen model is selected correctly at the beginning of the simulation.

To compare the results of the fractal method discussed in this paper, a three-dimensional simulation of the range was performed according to the Lee–Oldenburg method.

Using this method, the variable on which the interpretation will be based is first decided, magnetic self-acceptance or magnetic self-acceptance logarithm or a function of magnetic self-acceptance. A multi-component objective function is then constructed with sufficient flexibility to produce various models. The form of this objective function is such that it can be corrected for acceptable mathematical undesirable aspects such as the concentration of magnetic self-acceptance near the surface, the substantial structure, or the presence of negative magnetic self-acceptance. This objective function compensates for unevenness in three spatial directions and weighs based on the distribution of profound magnetic susceptibility. Three-dimensional auxiliary weighting functions in the objective function can combine more information about the model [23]. Such information may be available from other geophysical excavations, geological data, or the interpreter's quantitative and qualitative understanding of the geological structure and its relationship to magnetic susceptibility. These three-dimensional weighting functions can also be used to the answer questions about the magnetic susceptibility properties found in previous inverters. In this approach, negative magnetic

susceptibility is neglected by constructing a transformation of variables and solving a nonlinear reversal problem. Numerical solutions for inversion by dividing the earth into large cells have been realized to make relatively complex geological objects.

In this modeling, Mag3D software based on the Lee–Oldenburg method was used. The final source model is determined by preparing the data, entering them into the software environment, and determining the required parameters. For the study area, the dimensions of the mesh were determined according to the area's dimensions (length and width of the area), the length and width of the mesh were 16 meters, and its height was 8 meters. Then the magnitude of magnetic self-susceptibility to the separation of the anomaly from the field values was considered equal to 0,1 in the SI unit. The final model is shown in Fig. 7. As can be seen in this figure, the two sources of anomalies A and B in the range are identified, confirming the previous breadth and depth results. The source of the C anomaly is probably not present in the results of this modeling because it did not have a good scope in design. The maximum depth of the anomalies has continued up to about 700 meters, which is unrealistic because the accuracy of this method is low at great depths.

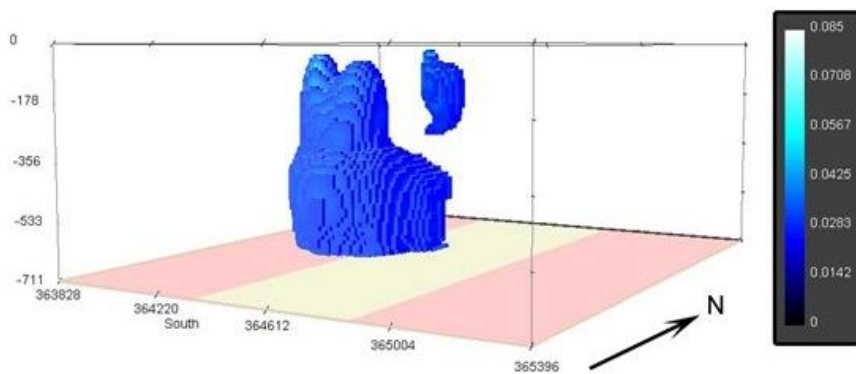


Fig. 7. Model obtained from the sources of the study area using the Lee–Oldenburg method

Рис. 7. Модель, полученная из источников исследуемой территории по методу Ли–Ольденбурга

Fig. 8, a shows a section of a three-dimensional diagram of the magnetic susceptibility data of the target area. To illustrate the point, Fig. 8, b shows the data

having magnetic self-susceptibility between 0,07 and 0,08. It can be seen that the existing masses have a source almost similar to the square-cube model.

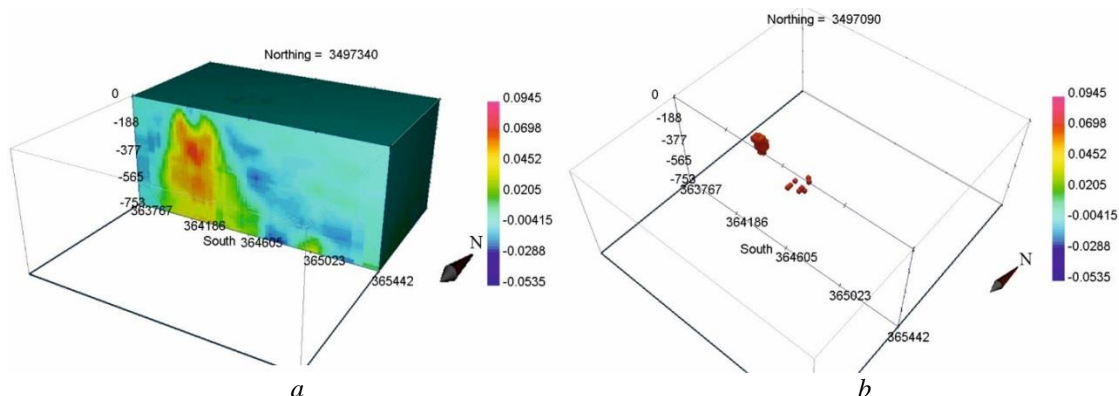


Fig. 8. Three-dimensional form of the magnetic self-susceptibility of the study area (a) and sources with magnetic susceptibility (b)

Рис. 8. Трехмерная форма геофизической аномалии исследуемой области (a) и возможные источники с магнитной восприимчивостью (b)

### Discussion and conclusions

According to the studies performed in the maps of the total magnetic field and the rest of the magnetic field, three anomalies in the range are clear and visible. Different maps are being discussed that failed to pinpoint the source of the anomaly. It is because the negative pole of the magnetic anomaly is not clear. The polarization map also confirms the possibility of a bipolar one for anomalies. While in the quasi-gravitational map this hypothesis can be refuted to some extent.

In this paper, the fractal is used to isolate magnetic anomalies from the field. Due to the superiority of this method over classical statistical methods, the RTP-area method was used for this purpose. Considering that artificial modeling is necessary to have more information for fractal calculations on accurate data, an artificial sample containing three types of sources was created. The results show that the sources of the square-cube have a relative proportion to the fractal models in the anomalous separation from the field. Considering that the spherical source has created two positive and negative poles in this sample, it can be seen that this method has some shortcomings in separating the anomalies between these two poles. The isolated data in the case study show that sources with a structure similar to the square-cube model

can be separated by the RTP-area fractal method. It is necessary to use this method for sources with a small depth, and the separation of magnetic anomalies from the field at great depths without considering specific parameters cannot be cited.

This study aimed to explore the source of iron ore and to isolate magnetic anomalies from the field. The identified area can be exploratory prioritized for further geochemical and geophysical studies. Due to the peculiarities of the geology of the region, in addition to magnetite, hematite also has the potential for mineralization in this area, which can be investigated by other geophysical methods (gravimetric, seismological and electrical) for a more detailed study. Because weak magnetic anomalies have been reported with high prevalence, it is recommended that at least the range gravimetric be taken. The possible source could be the mineralization of magnetite, which has been converted to hematite in the surface parts.

*This paper has been produced benefiting from the 2232 International Fellowship for Outstanding Researchers Program of TÜBİTAK (Project No: 118C219). However, the entire responsibility of the paper belongs to the owner of the paper. The financial support received from TÜBİTAK does not mean that the content of the publication is approved in a scientific sense by TÜBİTAK.*

### REFERENCES

1. Shirazy A., Shirazy A., Nazerian H. Application of remote sensing in earth sciences – a review. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 2021, vol. 10, pp. 45–51.
2. Gupta A.K., Srivastava S. Delineation of sulfide mineralization over a part of western margin of greenstone belt of the Dhanjori Basin, Singhbhum Craton from petrophysical, petrographic and geophysical studies. *Precambrian Research*, 2022, vol. 368, pp. 1–20.
3. Kaftan I. Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm. *Acta Geophysica*, 2017, vol. 65, no. 4, pp. 627–634.
4. Shirazy A., Ziaii M., Hezarkhani A., Timkin T. Geostatistical and remote sensing studies to identify high metallogenic potential regions in the Kivi area of Iran. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 1–25.
5. Wang G., Zhang S., Yan C., Xu G., Ma M., Li K., Feng Y. Application of the multifractal singular value decomposition for delineating geophysical anomalies associated with molybdenum occurrences in the Luanchuan ore field (China). *Journal of Applied Geophysics*, 2012, vol. 86, pp. 109–119.
6. Timkin T., Abedini M., Ziaii M., Ghasemi M.R. Geochemical and hydrothermal alteration patterns of the Abrisham-Rud Porphyry Copper District, Semnan Province, Iran. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 1–24.
7. Ben U.C., Akpan A.E., Urang J.G., Akaerue E.I., Obianwu V.I. Novel methodology for the geophysical interpretation of magnetic anomalies due to simple geometrical bodies using social spider optimization (SSO) algorithm. *Heliyon*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 1–21.
8. Shirazy A., Hezarkhani A., Shirazy A., Timkin T.V., Voroshilov V.G. Geophysical explorations by resistivity and induced polarization methods for the copper deposit, South Khorasan, Iran. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 99–110. In Rus.
9. Cherkasova (Yakich) T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymetamorphic zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba golddeposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, pp. 1–5.
10. Timkin T., Voroshilov V., Askanakova O., Cherkasova T., Chernyshov A., Korotchenko T. Estimating gold-ore mineralization potential within Topolninsk ore field (Gorny Altai). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, pp. 1–5.
11. Yakich T.Y., Ananyev Y.S., Ruban A.S., Gavrilov R.Y., Lesnyak D.V., Levochkaia D.V., Savinova O.V., Rudmin M.A. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration. *Ore Geol. Rev.*, 2021, vol. 136, 104257.
12. Shirazy A., Hezarkhani A., Timkin T., Shirazi A. Investigation of magneto-/radio-metric behavior in order to identify an estimator model using K-means clustering and Artificial Neural Network (ANN) (Iron Ore Deposit, Yazd, Iran). *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 12, pp. 1–18.
13. Sheykhi V., Moore F. Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor River, southwest Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 2013, vol. 185, no. 4, pp. 3219–3232.
14. Eslamizadeh A. Geological setting of iron oxide-apatite deposits in the Bafq district, central Iran with an emphasis on mineralogical, petrographic, and geochemical study of the Sechahun deposit. *Iranian Journal of Earth Sciences. Iranian Journal of Earth Sciences*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 147–163.
15. Majidi S., lotfi M., Emami M.H., Nezafati N. Investigation on the genesis of the iron oxide-apatite=REE deposits of the Bafgh-Saghand district (Central Iran), based on oxygen isotope studies. *Journal of Geoscience*, 2018, vol. 28, no. 109, pp. 237–244.
16. Pagano G., Aliberti F., Guida M., Oral R., Siciliano A., Trifuoggi M., Tommasi F. Rare earth elements in human and animal health: state of art and research priorities. *Environmental research*, 2015, vol. 142, pp. 215–220.
17. Wang G., Carranza E.J.M., Zuo R., Hao Y., Du Y., Pang Z., Sun Y., Qu J. Mapping of district-scale potential targets using fractal models. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, vol. 122, pp. 34–46.
18. Liang T., Li K., Wang L. State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China. *Environmental monitoring and assessment*, 2014, vol. 186, no. 3, pp. 1499–1513.
19. Carranza E.J.M. Catchment basin modelling of stream sediment anomalies revisited: incorporation of EDA and fractal analysis. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2010, vol. 10, pp. 365–381.
20. Nazerian E., Gharebaghi S., Safdarian A. Optimal distribution network reconfiguration considering power quality issues. *Smart Grid Conference (SGC)*, 2017, pp. 1–6.

21. Nazerian E., Tahami F. Optimum design of planar transformer for LLC resonant converter using metaheuristic method. *IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Lisbon, Portugal, 2019. pp. 6621–6626.
22. Khayer K., Shirazy A., Shirazi A., Ansari A., Nazerian H., Hezarkhani A. Determination of Archie's Tortuosity factor from Stoneley waves in carbonate reservoirs. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 2021, vol. 10, no. 08, pp. 107–110.
23. Shirazy A., Shirazi A., Nazerian H., Khayer K., Hezarkhani A. Geophysical study: estimation of deposit depth using gravimetric data and Euler method (Jalalabad iron mine, kerman province of IRAN). *Open Journal of Geology*, 2021, vol. 1, pp. 340–355.
24. Shirazy A., Shirazi A., Ferdossi M.H., Ziai M. Geochemical and geostatistical studies for estimating gold grade in tarq prospect area by k-means clustering method. *Open Journal of Geology*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 306–326.
25. Pignatelli A., Nicolosi I., Chiappini M. An alternative 3D inversion method for magnetic anomalies with depth resolution. *Annals of Geophysics*, 2006, vol. 49, no. 4–5, pp. 1021–1027.
26. Shirazy A., Ziai M., Hezarkhani A., Timkin T.V., Voroshilov V.G. Geochemical behavior investigation based on K-means and artificial neural network prediction for titanium and zinc, Kivi region, Iran. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 113–125. In Rus.
27. Oruç B., Selim H. Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, vol. 74, no. 4, pp. 194–204.
28. Alahgholi S., Shirazy A., Shirazi A. Geostatistical studies and anomalous elements detection, Bardaskan Area, Iran. *Open Journal of Geology*, 2018, vol. 8, no. 7, pp. 697–710.
29. Shirazi A., Shirazy A., Saki S., Hezarkhani, A. Geostatistics studies and geochemical modeling based on core data, Sheytoor Iron Deposit, Iran. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 2018, vol. 6, pp. 124–133.
30. Mohammadi N.M., Hezarkhani A., Saljooghi B.S. Separation of a geochemical anomaly from background by fractal and U-statistic methods, a case study: Khooni district, Central Iran. *Geochemistry*, 2016, vol. 76, no. 4, pp. 491–499.
31. Shirazi A., Shirazy A., Saki S., Hezarkhani A. Introducing a software for innovative neuro-fuzzy clustering method named NFCMR. *Global Journal of Computer Sciences: theory and research*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 62–69.
32. Shirazi A., Shirazy A. Introducing geotourism attractions in Toroud village, Semnan Province, Iran. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 79–86.
33. Timkin T.V., Voroshilov V.G., Yurkova M.V., Mansour Z. Ore mineralogy of Sokhatiny gold deposit (Northeast Asia, Russia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 53–65. In Rus.
34. Li C., Ma T., Shi J. Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background. *Journal of Geochemical exploration*, 2003, vol. 77, no. 2–3, pp. 167–175.
35. Doodran R.J., Khakmardan S., Shirazi A., Shirazy A. Minimalization of ash from Iranian Gilsonite by Froth Flotation. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2021, vol. 9, pp. 1–13.
36. Shirazi A., Hezarkhani A., Shirazy A. Remote sensing studies for mapping of iron oxide regions, South of Kerman, Iran. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 45–51.
37. Shirazi A., Shirazy A., Karami J. Remote sensing to identify copper alterations and promising regions, Sarbishe, South Khorasan, Iran. *International Journal of Geology and Earth Sciences*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 36–52.
38. Grunsky E., Agterberg F. Spatial and multivariate analysis of geochemical data from metavolcanic rocks in the Ben Nevis area, Ontario. *Mathematical Geology*, 1988, vol. 20, no. 7, pp. 825–861.
39. Cheng Q., Agterberg F., Ballantyne S. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical exploration*, 1994, vol. 51, no. 2, pp. 109–130.
40. Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, vol. 3775, no. 156, pp. 636–638.
41. Chen G., Cheng Q., Zhang H. Matched filtering method for separating magnetic anomaly using fractal model. *Computers & Geosciences*, 2016, vol. 90, pp. 179–188.
42. Liu J., Ding W., Dai J., Zhao G., Sun Y., Yang H. Unreliable determination of fractal characteristics using the capacity dimension and a new method for computing the information dimension. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2018, vol. 113, pp. 16–24.
43. Pignatelli A., Nicolosi I., Carluccio R., Chiappini M., Von Frese R. Graphical interactive generation of gravity and magnetic fields. *Computers & Geosciences*, 2011, vol. 37, no. 4, pp. 567–572.
44. Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*, 1984, vol. 308, no. 5961, pp. 721–722.
45. Mandelbrot B.B. *The fractal geometry of nature*. New York, WH freeman, 1982. 460 p.
46. Wang Q.F., Wan L., Zhang Y., Zhao J., Liu H. Number-average size model for geological systems and its application in economic geology. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 447–454.
47. Zuo R., Xia Q., Zhang D. A comparison study of the C–A and S–A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas. *Applied Geochemistry*, 2013, vol. 33, pp. 165–172.
48. Guan W., Hu H., Wang Z. Permeability inversion from low-frequency seismoelectric logs in fluid-saturated porous formations. *Geophysical Prospecting*, 2013, vol. 61, no. 1, pp. 120–133.
49. Panichev A. Rare earth elements: review of medical and biological properties and their abundance in the rock materials and mineralized spring waters in the context of animal and human geophagia reasons evaluation. *Achievements in the Life Sciences*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 95–103.
50. Ahmadi H., Rahmani A.B. Study on the mineral anomalies of Muqur-Chaman fault and its comparison with Harirud (Herat) fault (Afghanistan) using geophysical and remote sensing (Aster-HyMap) data. *Geology and bowels of the earth*, 2018, no. 1 (66), pp. 28–38.
51. Agharezaei M., Hezarkhani A. Delineation of geochemical anomalies based on Cu by the boxplot as an exploratory data analysis (EDA) method and concentration-volume (CV) fractal modeling in Mesgaran mining area, Eastern Iran. *Open Journal of Geology*, 2016, vol. 6, no. 10, pp. 1269–1278.
52. Daigle H., Johnson A., Thomas B. Determining fractal dimension from nuclear magnetic resonance data in rocks with internal magnetic field gradients. *Geophysics*, 2014, vol. 79, no. 6, pp. 425–431.
53. Meakin P. Fractal aggregates in geophysics. *Reviews of Geophysics*, 1991, vol. 29, no. 3, pp. 317–354.
54. Mazzarella A., Tranfaglia G. Fractal characterisation of geophysical measuring networks and its implication for an optimal location of additional stations: an application to a rain-gauge network. *Theoretical and Applied Climatology*, 2000, vol. 65, no. 3, pp. 157–163.
55. Turcotte D.L. Fractals in geology and geophysics. *Pure and applied Geophysics*, 1989, vol. 131, no. 1, pp. 171–196.
56. Ghorbani M. *The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources*. New York, Springer, 2013. 569 p.
57. Lehmann B. Economic geology of rare earth elements in 2014: a global perspective. *European Geologist*, 2014, vol. 37, pp. 21–24.
58. Menard S. *Applied logistic regression analysis*. Sage publications. London, Sage Publications, 2001. 111 p.
59. Guan W., Hu H., Wang Z. Technospheric mining of rare earth elements from bauxite residue (Red Mud): process optimization, kinetic investigation, and microwave pretreatment. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 1–9.
60. Zhang W., Liao G., Qin Q. Based on open-source GIS platform to build 2D visual geophysical information management software. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, vol. 5, pp. 1064–1069.
61. Faults J.E. *Geologic map and cross sections of the McGinness Hills Geothermal Area – GIS data*. Las Vegas, University of Nevada, 2013.
62. Pawlowski R. GIS applied to exploration: Caserta Block, Central Apennines, southern Italy. *The Leading Edge*, 2000, vol. 19, no. 2, pp. 193–196.
63. Ekosse G., Fouche P.S. Using GIS to understand the environmental chemistry of manganese contaminated soils,

- Kgwakgwe area, Botswana. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2005, vol. 9, no. 2, pp. 37–42.
64. Shahsavari S., Rad J.A., Afzal P., Nezafati N., Akhavan A.M. Prospecting for polymetallic mineralization using step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) and fractal modeling in Aghkand Area, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, vol. 12, no. 7, pp. 1–10.
65. Yan Z.-H. Seismic random noise attenuation based on empirical mode decomposition of fractal dimension. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, vol. 60, no. 7, pp. 2845–2857.
66. Al-Ghamdi A., Aguilera R., Clarkson C.R. Cementation exponent estimation for complex carbonate reservoirs using a triple porosity model. *Society of Petroleum Engineers - SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*. Al-Khobar, Saudi Arabia, 2011, pp. 159–170.
67. Jacobson J.J., Yacout A.M., Matthem G.E., Piet S.J., Shropshire D.E., Jeffers R.F., Schweitzer T. Verifiable fuel cycle simulation model (VISION): a tool for analyzing nuclear fuel cycle futures. *Nuclear Technology*, 2010, vol. 172, no. 2, pp. 157–178.
68. MacLeod I.N., Jones K., Dai T.F. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *Exploration geophysics*, 1993, vol. 24, no. 3–4, pp. 679–688.
69. Pulkkinen A., Kuznetsova M., Ridley A., Raeder J., Vapirev A., Weimer D., Weigel R.S., Wiltberger M., Millward G., Rastätter L., Hesse M., Singer H.J., Chulaki A. Geospace environment modeling 2008–2009 challenge: ground magnetic field perturbations. *Space Weather*, 2011, vol. 9, no. 2, pp. 1–13.
70. Fogler M., Koulakov A., Shklovskii B. Ground state of a two-dimensional electron liquid in a weak magnetic field. *Physical Review B*, 1996, vol. 54, no. 3, pp. 1853–1871.
71. Bu Y.Y., Erdmenger J., Shock J.P., Strydom M. Magnetic field induced lattice ground states from holography. *Journal of High Energy Physics*, 2013, vol. 165, pp. 1–28.
72. Ashoori R.C., Stormer H.L., Weiner J.S., Pfeiffer L.N., Baldwin K.W., West K.W. N-electron ground state energies of a quantum dot in magnetic field. *Physical review letters*, 1993, vol. 71, no. 4, pp. 613–616.
73. Gorbar E., Miransky V., Shovkovy I. Normal ground state of dense relativistic matter in a magnetic field. *Physical Review D*, 2011, vol. 83, no. 8, pp. 1–26.
74. Liu P., Liu T., Zhu P., Yang Y., Zhou Q., Zhang H., Chen G. Depth estimation for magnetic/gravity anomaly using model correction. *Pure & Applied Geophysics*, 2017, vol. 174, no. 4, pp. 1729–1742.

Received: 24 September 2022.

Reviewed: 3 March 2023.

#### Information about the authors

- Amin Karimi Kalvarzi**, PhD, assistant, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).  
**Aref Shirazi**, PhD, assistant, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).  
**Adel Shirazy**, PhD, assistant, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).  
**Amin Beiranvand Pour**, PhD, associate professor, University Malaysia Terengganu.  
**Ardeshir Hezarkhani**, PhD, full professor, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).  
**Hamed Nazerian**, PhD, assistant, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).  
**Timofey V. Timkin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Valery G. Voroshilov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.8+550.84.09

## РАЗДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ ФРАКТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ ПОИСКА ЖЕЛЕЗНЫХ РУД, РАЙОН ЭСФОРДИ, ЦЕНТРАЛЬНО-ВОСТОЧНЫЙ ИРАН

Амин Карими Калварзи<sup>1</sup>,  
Adel.shirazy@shahroodut.ac.ir

Ареф Ширази<sup>1</sup>,  
Adel.shirazy@shahroodut.ac.ir

Адель Ширази<sup>1</sup>,  
Adel.shirazy@shahroodut.ac.ir

Амин Бейранванд Пур<sup>2</sup>,  
beiranvand.pour@umt.edu.my

Ардешир Хезархани<sup>1</sup>,  
Ardehez@aut.ac.ir

Хамед Назерян<sup>1</sup>,  
Adel.shirazy@shahroodut.ac.ir

Тимкин Тимофей Васильевич<sup>3</sup>,  
timkin@tpu.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович<sup>3</sup>,  
v\_g\_v@tpu.ru

<sup>1</sup> Технологический университет им. Амир Кабира (Тегеранский политехнический институт), Иран, 1591634311, Тегеран, Авеню Хафеза.

<sup>2</sup> Университет Малайзии Теренгану, Малайзия, 21030, Теренгану, Куала-Нерус.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследований определяется возможностями измерений потенциального магнитного поля, которое обладает самоподобными (фрактальными) свойствами, вследствие чего фрактальный метод можно использовать для выявления магнитных аномалий, а также как практический инструмент для поиска и разведки железных руд. На площади Эсфорди этот метод использован нами впервые для выявления, разделения и интерпретации геофизических (магнитных) аномалий.

**Основной целью** данного тематического и практического исследования является качественная интерпретация геофизических данных, применение новых методов при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, моделировании геологической среды и прогнозировании новых перспективных участков.

**Объект:** район Эсфорди, провинция Йезд, Иран.

**Методы.** Для получения дополнительной информации о недрах использовались магнитометрические данные с интерпретацией их методом RTP (редукция к северному магнитному полюсу). Для целей моделирования был изготовлен искусственный образец, состоящий из сферы, куба и прямоугольного параллелепипеда, и было обнаружено, что фрактальным методом можно провести разделение аномалий для униполярных моделей (куба и прямоугольного параллелепипеда).

**Полученные результаты.** Результаты исследования были применены к региону Эсфорди, где установлено, что в масштабе исследований 1:100000 между фрактальным методом и трехмерной моделью существует прямая связь, которая может быть использована для определения местоположения железорудной минерализации.

### Ключевые слова:

магнитные аномалии, фрактал, метод RTP, моделирование, железные руды, район Эсфорди, Иран.

Статья была подготовлена в рамках Международной стипендиальной программы для выдающихся исследователей TÜBİTAK 2232 (проект № 118C219). Однако вся ответственность за публикацию статьи лежит на её владельце. Финансовая поддержка, полученная от TÜBİTAK, не означает, что содержание публикации одобрено TÜBİTAK в научном смысле.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shirazy A., Shirazy A., Nazerian H. Application of remote sensing in earth sciences – a review // International Journal of Science and Engineering Applications. – 2021. – V. 10. – P. 45–51.
2. Gupta A.K., Srivastava S. Delineation of sulfide mineralization over a part of western margin of greenstone belt of the Dhanjori Basin, Singhbhum Craton from petrophysical, petrographic and geophysical studies // Precambrian Research. – 2022. – V. 368. – P. 1–20.
3. Kaftan I. Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm // Acta Geophysica. – 2017. – V. 65. – № 4. – P. 627–634.
4. Geostatistical and remote sensing studies to identify high metallogenic potential regions in the Kivi Area of Iran / A. Shirazy, M. Ziaii, A. Hezarkhani, T. Timkin // Minerals. – 2020. – V. 10. – P. 1–25.
5. Application of the multifractal singular value decomposition for delineating geophysical anomalies associated with molybdenum occurrences in the Luanchuan ore field (China) / G. Wang, S. Zhang, C. Yan, G. Xu, M. Ma, K. Li, Y. Feng // Journal of Applied Geophysics. – 2012. – V. 86. – P. 109–119.
6. Geochemical and hydrothermal alteration patterns of the Abrisham-Rud Porphyry Copper District, Semnan Province, Iran / T. Timkin, M. Abedini, M. Ziaii, M.R. Ghasemi // Minerals. – 2022. – V. 12. – № 1. – P. 1–24.
7. Novel methodology for the geophysical interpretation of magnetic anomalies due to simple geometrical bodies using social spider optimization (SSO) algorithm / U.C. Ben, A.E. Akpan, J.G. Urang, E.I. Akaerue, V.I. Obianwu // Heliyon. – 2022. – V. 8. – № 3. – P. 1–21.
8. Применение геофизических методов удельного электрического сопротивления и вызванной поляризации при поиске медных руд, южный Хорасан, Иран / А. Ширази, А. Хезархани, А. Ширази, Т.В. Тимкин, В.Г. Ворошилов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 99–110.
9. Cherkasova (Yakich) T., Kucherenko I., Abramova R. Rearpolymineral zone of near-veined metasomatic aureole in

- mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. – P. 1–5.
10. Estimating gold-ore mineralization potential within Topolninsk ore field (Gorny Altai) / T. Timkin, V. Voroshilov, O. Askanakova, T. Cherkasova, A. Chernyshov, T. Korotchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. – P. 1–5.
  11. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotkavolcanic belt, and its insights for exploration / T.Yu. Yakich, Y.S. Ananyev, A.S. Ruban, R.Y. Gavrilov, D.V. Lesnyak, D.V. Levochkaia, O.V. Savinova, M.A. Rudmin // Ore Geology Reviews. – 2021. – V. 136. – 104257.
  12. Investigation of magneto-radio-metric behavior in order to identify an estimator model using K-means clustering and Artificial Neural Network (ANN) (Iron Ore Deposit, Yazd, IRAN) / A. Shirazy, A. Hezarkhani, T. Timkin, A. Shirazi // Minerals. – 2021. – V. 11. – № 12. – P. 1–18.
  13. Sheykhi V., Moore F. Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor River, southwest Iran // Environmental monitoring and assessment. – 2013. – V. 185. – № 4. – P. 3219–3232.
  14. Eslamizadeh A. Geological setting of iron oxide-apatite deposits in the Bafq district, central Iran with an emphasis on mineralogical, petrographic, and geochemical study of the Sechahun deposit // Iranian Journal of Earth Sciences. Iranian Journal of Earth Sciences. – 2016. – V. 8. – № 2. – P. 147–163.
  15. Investigation on the genesis of the iron oxide-apatite=REE deposits of the Bafgh-Saghand district (Central Iran), based on oxygen isotope studies / S. Majidi, M. lotfi, M.H. Emami, N. Nezafati // Journal of Geoscience. – 2018. – V. 28. – № 109. – P. 237–244.
  16. Rare earth elements in human and animal health: state of art and research priorities / G. Pagano, F. Aliberti, M. Guida, R. Oral, A. Siciliano, M. Trifuoggi, F. Tommasi // Environmental research. – 2015. – V. 142. – P. 215–220.
  17. Mapping of district-scale potential targets using fractal models / G. Wang, E.J.M. Carranza, R. Zuo, Y. Hao, Y. Du, Z. Pang, Y. Sun, J. Qu // Journal of Geochemical Exploration. – 2012. – V. 122. – P. 34–46.
  18. Liang T., Li K., Wang L. State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China // Environmental monitoring and assessment. – 2014. – V. 186. – № 3. – P. 1499–1513.
  19. Carranza E.J.M. Catchment basin modelling of stream sediment anomalies revisited: incorporation of EDA and fractal analysis // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2010. – V. 10. – P. 365–381.
  20. Nazerian E., Gharebaghi S., Safdarian A. Optimal distribution network reconfiguration considering power quality issues // Smart Grid Conference (SGC). – 2017. – P. 1–6.
  21. Nazerian E., Tahami F. Optimum design of planar transformer for LLC resonant converter using metaheuristic method // IECON 2019 – 45<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Lisbon, Portugal, 2019. – P. 6621–6626.
  22. Determination of Archie's tortuosity factor from Stoneley waves in carbonate reservoirs / K. Khayer, A. Shirazy, A. Shirazi, A. Ansari, H. Nazerian, A. Hezarkhani // International Journal of Science and Engineering Applications. – 2021. – V. 10. – № 08. – P. 107–110.
  23. Geophysical study: estimation of deposit depth using gravimetric data and Euler method (Jalalabad iron mine, kerman province of IRAN) / A. Shirazy, A. Shirazi, H. Nazerian, K. Khayer, A. Hezarkhani // Open Journal of Geology. – 2021. – V. 1. – P. 340–355.
  24. Geochemical and geostatistical studies for estimating gold grade in tarq prospect area by k-means clustering method / A. Shirazy, A. Shirazi, M.H. Ferdossi, M. Ziaii // Open Journal of Geology. – 2019. – V. 9. – № 6. – P. 306–326.
  25. Pignatelli A., Nicolosi I., Chiappini M. An alternative 3D inversion method for magnetic anomalies with depth resolution // Annals of Geophysics. – 2006. – V. 49. – № 4–5. – P. 1021–1027.
  26. Исследование геохимического поведения титана и цинка на основе метода k-средних и искусственных нейронных сетей для прогнозирования новых площадей, регион Киви, Иран / А. Ширази, М. Зиани, А. Хезархани, Т.В. Тимкин, В.Г. Ворошилов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 113–125.
  27. Oruç B., Selim H. Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform // Journal of Applied Geophysics. – 2011. – V. 74. – № 4. – P. 194–204.
  28. Alahgholi S., Shirazy A., Shirazi A. Geostatistical studies and anomalous elements detection, Bardaskan Area, Iran // Open Journal of Geology. – 2018. – V. 8. – № 7. – P. 697–710.
  29. Geostatistics studies and geochemical modeling based on core data, Sheytoor iron deposit, Iran / A. Shirazi, A. Shirazy, S. Saki, A. Hezarkhani // Journal of Geological Resource and Engineering. – 2018. – V. 6. – P. 124–133.
  30. Mohammadi N.M., Hezarkhani A., Saljooghi B.S. Separation of a geochemical anomaly from background by fractal and U-statistic methods, a case study: Khooni district, Central Iran // Geochemistry. – 2016. – V. 76. – № 4. – P. 491–499.
  31. Introducing a software for innovative neuro-fuzzy clustering method named NFCMR / A. Shirazi, A. Shirazy, S. Saki, A. Hezarkhani // Global Journal of Computer Sciences: theory and research. – 2018. – V. 8. – № 2. – P. 62–69.
  32. Shirazi A., Shirazy A. Introducing geotourism attractions in Toroud village, Semnan Province, Iran // International Journal of Science and Engineering Applications. – 2020. – V. 9. – № 6. – P. 79–86.
  33. Минералогия руд Сохагинского золоторудного месторождения (Северо-Восток Азии, Россия) / Т.В. Тимкин, В.Г. Ворошилов, М.В. Юркова, М. Зиани // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 53–65.
  34. Li C., Ma T., Shi J. Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background // Journal of Geochemical exploration. – 2003. – V. 77. – № 2–3. – P. 167–175.
  35. Minimalization of ash from Iranian Gilsonite by Froth Flotation / R.J. Doodran, S. Khakmardan, A. Shirazi, A. Shirazy // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2021. – V. 9. – P. 1–13.
  36. Shirazi A., Hezarkhani A., Shirazy A. Remote sensing studies for mapping of iron oxide regions, South of Kerman, Iran // International Journal of Science and Engineering Applications. – 2018. – V. 7. – № 4. – P. 45–51.
  37. Shirazi A., Shirazy A., Karami J. Remote sensing to identify copper alterations and promising regions, Sarbishe, South Khorasan, Iran // International Journal of Geology and Earth Sciences. – 2018. – V. 4. – № 2. – P. 36–52.
  38. Grunsky E., Agterberg F. Spatial and multivariate analysis of geochemical data from metavolcanic rocks in the Ben Nevis area, Ontario // Mathematical Geology. – 1988. – V. 20. – № 7. – P. 825–861.
  39. Cheng Q., Agterberg F., Ballantyne S. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods // Journal of Geochemical exploration. – 1994. – V. 51. – № 2. – P. 109–130.
  40. Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension // Science. – 1967. – V. 3775. – № 156. – P. 636–638.
  41. Chen G., Cheng Q., Zhang H. Matched filtering method for separating magnetic anomaly using fractal model // Computers & Geosciences. – 2016. – V. 90. – P. 179–188.
  42. Unreliable determination of fractal characteristics using the capacity dimension and a new method for computing the information dimension / J. Liu, W. Ding, J. Dai, G. Zhao, Y. Sun, H. Yang // Chaos, Solitons & Fractals. – 2018. – V. 113. – P. 16–24.
  43. Graphical interactive generation of gravity and magnetic fields / A. Pignatelli, I. Nicolosi, R. Carluccio, M. Chiappini, R. von Frese // Computers & Geosciences. – 2011. – V. 37. – № 4. – P. 567–572.
  44. Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J. Fractal character of fracture surfaces of metals // Nature. – 1984. – V. 308. – № 5961. – P. 721–722.
  45. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. – New York: WH freeman, 1982. – 460 p.
  46. Number-average size model for geological systems and its application in economic geology / Q.F. Wang, L. Wan, Y. Zhang, J. Zhao, H. Liu // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2011. – V. 18. – № 4. – P. 447–454.



47. Zuo R., Xia Q., Zhang D. A comparison study of the C–A and S–A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas // *Applied Geochemistry*. – 2013. – V. 33. – P. 165–172.
48. Guan W., Hu H., Wang Z. Permeability inversion from low-frequency seismoelectric logs in fluid-saturated porous formations // *Geophysical Prospecting*. – 2013. – V. 61. – № 1. – P. 120–133.
49. Panichev A. Rare earth elements: review of medical and biological properties and their abundance in the rock materials and mineralized spring waters in the context of animal and human geophagia reasons evaluation // *Achievements in the Life Sciences*. – 2015. – V. 9. – № 2. – P. 95–103.
50. Ahmadi H., Rahmani A.B. Study on the mineral anomalies of Muqur-Chaman fault and its comparison with Harirud (Herat) fault (Afghanistan) using geophysical and remote sensing (Aster - HyMap) data // *Geology and bowels of the earth*. – 2018. – № 1 (66). – P. 28–38.
51. Agharezaei M., Hezarkhani A. Delineation of geochemical anomalies based on Cu by the boxplot as an exploratory data analysis (EDA) method and concentration-volume (CV) fractal modeling in Mesgaran mining area, Eastern Iran // *Open Journal of Geology*. – 2016. – V. 6. – № 10. – P. 1269–1278.
52. Daigle H., Johnson A., Thomas B. Determining fractal dimension from nuclear magnetic resonance data in rocks with internal magnetic field gradients // *Geophysics*. – 2014. – V. 79. – № 6. – P. 425–431.
53. Meakin P. Fractal aggregates in geophysics // *Reviews of Geophysics*. – 1991. – V. 29. – № 3. – P. 317–354.
54. Mazzarella A., Tranfaglia G. Fractal characterisation of geophysical measuring networks and its implication for an optimal location of additional stations: an application to a rain-gauge network // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2000. – V. 65. – № 3. – P. 157–163.
55. Turcotte D.L. Fractals in geology and geophysics // *Pure and applied Geophysics*. – 1989. – V. 131. – № 1. – P. 171–196.
56. Ghorbani M. The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources. – New York: Springer, 2013. – 569 p.
57. Lehmann B. Economic geology of rare earth elements in 2014: a global perspective // *European Geologist*. – 2014. – V. 37. – P. 21–24.
58. Menard S. Applied logistic regression analysis. Sage publications. – London: Sage Publications, 2001. – 111 p.
59. Guan W., Hu H., Wang Z. Technospheric mining of rare earth elements from bauxite residue (Red Mud): process optimization, kinetic investigation, and microwave pretreatment // *Scientific Reports*. – 2017. – V. 7. – № 1. – P. 1–9.
60. Zhang W., Liao G., Qin Q. Based on open-source GIS platform to build 2D visual geophysical information management software // *Geophysical and Geochemical Exploration*. – 2014. – V. 5. – P. 1064–1069.
61. Faulds J.E. Geologic map and cross sections of the McGinness Hills Geothermal Area – GIS data. – Las Vegas, University of Nevada, 2013.
62. Pawlowski R. GIS applied to exploration: Caserta Block, Central Apennines, southern Italy // *The Leading Edge*. – 2000. – V. 19. – № 2. – P. 193–196.
63. Ekosse G., Fouche P.S. Using GIS to understand the environmental chemistry of manganese contaminated soils, Kgwagwe area, Botswana // *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. – 2005. – V. 9. – № 2. – P. 37–42.
64. Prospecting for polymetallic mineralization using step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) and fractal modeling in Aghkand Area, NW Iran / S. Shahsavari, J.A. Rad, P. Afzal, N. Nezafati, A.M. Akhavan // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2019. – V. 12. – № 7. – P. 1–10.
65. Yan Z.-H. Seismic random noise attenuation based on empirical mode decomposition of fractal dimension // *Chinese Journal of Geophysics*. – 2017. – V. 60. – № 7. – P. 2845–2857.
66. Al-Ghamdi A., Aguilera R., Clarkson C.R. Cementation exponent estimation for complex carbonate reservoirs using a triple porosity model // *Society of Petroleum Engineers - SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*. – Al-Khobar, Saudi Arabia, 2011. – P. 159–170.
67. Verifiable fuel cycle simulation model (VISION): a tool for analyzing nuclear fuel cycle futures / J.J. Jacobson, A.M. Yacout, G.E. Mathern, S.J. Piet, D.E. Shropshire, R.F. Jeffers, T. Schweitzer // *Nuclear Technology*. – 2010. – V. 172. – № 2. – P. 157–178.
68. MacLeod I.N., Jones K., Dai T.F. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes // *Exploration geophysics*. – 1993. – V. 24. – № 3–4. – P. 679–688.
69. Geospace environment modeling 2008–2009 challenge: ground magnetic field perturbations / A. Pulkkinen, M. Kuznetsova, A. Ridley, J. Raeder, A. Vapirev, D. Weimer, R.S. Weigel, M. Wiltberger, G. Millward, L. Rastätter, M. Hesse, H.J. Singer, A. Chulaki // *Space Weather*. – 2011. – V. 9. – № 2. – P. 1–13.
70. Fogler M., Koulakov A., Shklovskii B. Ground state of a two-dimensional electron liquid in a weak magnetic field // *Physical Review B*. – 1996. – V. 54. – № 3. – P. 1853–1871.
71. Magnetic field induced lattice ground states from holography / Y.Y. Bu, J. Erdmenger, J.P. Shock, M. Strydom // *Journal of High Energy Physics*. – 2013. – V. 165. – P. 1–28.
72. N-electron ground state energies of a quantum dot in magnetic field / R.C. Ashoori, H.L. Stormer, J.S. Weiner, L.N. Pfeiffer, K.W. Baldwin, K.W. West // *Physical review letters*. – 1993. – V. 71. – № 4. – P. 613–616.
73. Gorbar E., Miransky V., Shovkovy I. Normal ground state of dense relativistic matter in a magnetic field // *Physical Review D*. – 2011. – V. 83. – № 8. – P. 1–26.
74. Depth estimation for magnetic/gravity anomaly using model correction / P. Liu, T. Liu, P. Zhu, Y. Yang, Q. Zhou, H. Zhang, G. Chen // *Pure & Applied Geophysics*. – 2017. – V. 174. – № 4. – P. 1729–1742.

Поступила: 24.09.2022 г.

Прошла рецензирование: 03.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Амин Карими Калварзи**, PhD, ассистент Технологического университета им. Амир Кабира (Тегеранский политехнический институт).

**Ареф Ширази**, PhD, ассистент Технологического университета им. Амир Кабира (Тегеранский политехнический институт).

**Адель Ширази**, PhD, ассистент Технологического университета им. Амир Кабира (Тегеранский политехнический институт).

**Амин Бейранванд Пур**, PhD, доцент Университета Малайзии Теренгану.

**Ардешир Хезархани**, PhD, профессор Технологического университета им. Амир Кабира (Тегеранский политехнический институт).

**Хамед Назерян**, ассистент Технологического университета им. Амир Кабира (Тегеранский политехнический институт).

**Тимкин Т.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ворошилов В.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК 622.276.66

## ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Ямкин Максим Александрович<sup>1</sup>,  
makson.yamkin@mail.ru

Сафиуллина Елена Улубековна<sup>1</sup>,  
safullinaeu@yandex.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я лин. В.О., 2.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью точного расчета параметров гидроразрыва пласта, который все чаще применяется в настоящее время в качестве метода интенсификации притока, а также как метод увеличения нефтеотдачи в силу того, что все чаще запасы нефти и газа на различных месторождениях стали приурочиваться к трудноизвлекаемым. Поэтому для наиболее точной оценки эффективности гидроразрыва пласта необходимо подобрать модель, которая будет описывать гидроразрыв наиболее точно.

**Цель** данной исследовательской работы заключается в анализе основных одномерных моделей гидроразрыва пласта, оценке их сходимости с реальными данными и выявлении наиболее точной модели с использованием данных Ванкорского нефтегазового месторождения.

**Объект:** одномерные модели гидроразрыва пласта.

**Методы:** моделирование гидроразрыва пласта на языке программирования Python с последующей оценкой сходимости смоделированных данных с реальными данными, полученными с Ванкорского нефтегазового месторождения.

**Результаты.** В процессе исследования было показано, что наибольшей сходимостью среди основных одномерных моделей гидроразрыва пласта с использованием данных Ванкорского месторождения обладает радиальная модель гидроразрыва пласта. Модель PKN (Perkins and Kern and Nordgren) обладает сходимостью 60,3 %, модель KGD (Khristianovich and Zheltov and Geertsma and de-Klerk) обладает сходимостью 68,9 %, радиальная модель обладает сходимостью 78,2 %. Однако данные модели все же недостаточно точно описывают гидроразрыв пласта, поэтому целью дальнейших исследований является создание наиболее точной модели, описывающей гидроразрыв пласта, а также создание двух- и трехмерных моделей.

**Вывод.** В ходе проделанной работы было определено, что наибольшей сходимостью среди основных одномерных моделей гидроразрыва пласта обладает радиальная модель (сходимость 78,2 %).

### Ключевые слова:

Приток нефти, гидроразрыв пласта, модель, PKN, KGD, радиальная модель, трещины гидроразрыва пласта.

### Введение

В настоящее время все больше приобретает актуальность разработка месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти [1]. Существует множество методов разработки данных месторождений с привлечением современных технологий. Из них наиболее широко применяется такая технология, как гидроразрыв пласта (ГРП) [1]. ГРП используется и в качестве метода интенсификации притока, и в качестве метода увеличения нефтеотдачи. Как метод увеличения нефтеотдачи ГРП используется для повышения коэффициента охвата, который в свою очередь повышает текущий коэффициент извлечения нефти путем создания дополнительных высокопроницаемых каналов, вводя в эксплуатацию те зоны, которые до проведения операции ГРП не могли быть задействованы при эксплуатации (трудноизвлекаемые запасы нефти) [2]. ГРП может, в том числе, использоваться и как метод интенсификации притока, положительно воздействуя на экономику проекта, так как из скважины с ГРП можно добыть нефть быстрее [2].

Однако, несмотря на все положительные стороны ГРП, существуют также и отрицательные. Так, при неправильном проектировании трещины гидроразрыва пласта вероятно загрязнение призабойной зоны пласта (ПЗП), что приводит к закупориванию каналов,

по которым может фильтроваться флюид, что будет негативно сказываться на дебите скважины, на которой проводили ГРП [2]. В дополнение к этому трещина может быть неправильно спроектирована и вследствие этого может попасть в водонефтяную зону, из-за чего в скважине будет наблюдаться резкий рост добычи воды (обводненность), что негативно скажется на проекте [2].

В связи с вышеперечисленными недостатками технологии ГРП и с масштабным ее применением актуальным является моделирование трещин ГРП с целью расчета его параметров. В данной статье авторами рассматривается анализ различных моделей ГРП с использованием данных Ванкорского нефтегазового месторождения.

### Актуальность

Ванкорское нефтегазовое месторождение располагается в Красноярском крае России, находится в разработке с 2006 г. Компания недропользователь – «РН-Ванкор». В настоящее время на месторождении добыча ведется из нескольких пластов. Ванкорское нефтегазовое месторождение включает в себя следующие объекты (Дл I-III, Як I-VII, Сд-IX, Нх-I, Нх-III-IX) [2]. В рамках анализа ГРП наибольшего внимания из них заслуживает эксплуатационный объект Нх-I, так

как запасы нефти на остальных объектах являются контактными и проведение операции ГРП на данных пластах может привести к ускоренному прорыву подошвенной воды либо газа газовой шапки [1]. В дальнейшем авторами будет приводиться описание лишь эксплуатационного объекта Нх-1 и скважин для его эксплуатации.

Основные геологические свойства и показатели разработки объекта Нх-1 приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные геологические свойства и показатели разработки [1–3]

**Table 1.** Main geological properties and development indicators [1–3]

Параметр/Parameter	Значение/Meaning
Пористость/Porosity, %	19
Проницаемость, мкм <sup>2</sup> Permeability, mcm <sup>2</sup>	0,001
Расчлененность Dismemberment	3,6
Горная порода Rock	Алевролит с прослоями аргиллитов Siltstone with mudstone interlayers
Текущая обводненность Current water cut, %	13,02

Из табл. 1 видно, что месторождение обладает низкой проницаемостью, что осложняет его разработку. Также на объекте присутствует глинистый пропласток, который затрудняет его разработку. Существуют методы для повышения проницаемости месторождений, такие как кислотная обработка, ГРП, тепловая обработка призабойной зоны пласта [1]. Однако, учитывая, что текущая обводненность объекта Нх-1 равна 13,02 % [2], наиболее эффективным из методов увеличения нефтеотдачи представляется ГРП, так как значение обводненности небольшое [4]. Исходя из вышеизложенного, целесообразным представляется проведение операции ГРП для увеличения проницаемости объекта, а также для создания единой гидродинамической системы по объекту для улучшения показателей разработки месторождения.

При этом общеизвестно, что проведение операции гидроразрыва связано с существенными материальными и временными затратами, поэтому на этапе подготовки работ ключевую роль играет математическое моделирование ГРП с целью прогнозирования развития процесса и определения оптимальных параметров при проведении работ [5]. В связи с этим целью настоящего исследования являлось проведение анализа различных моделей фильтрации к трещинам ГРП с использованием данных Ванкорского нефтегазового месторождения и определение наиболее эффективной из них, позволяющей наиболее точно описать гидроразрыв пласта. Существует несколько одномерных моделей. Основные из них это: модель Христиановича–Гиртсма–де Клерка (KGD), радиальная модель и модель Перкинса–Керна–Нордгрена (PKN) [5]. В рамках данной статьи не рассматриваются двух и трехмерные модели трещин ГРП. Далее приводится краткое описание каждой модели.

1. Модель KGD. Данная модель является одной из первых геомеханических моделей трещины ГРП.

В модели KGD рассматривается плоская вертикальная трещина, в качестве жидкости разрыва пласта используется ньютоновская жидкость, которая закачивается в линейно-упругую среду через длинный перфорационный интервал вдоль высоты трещины, по этой причине в рамках данной модели пренебрегают краевыми эффектами. По мере движения жидкости к концу трещины ее ширина уменьшается, при этом по высоте трещина остается постоянной [5–9].

2. Радиальная модель. Данная модель описывает радиальное симметричное распространение жидкости из точечного источника. Данная модель является обобщением модели KGD для случая, если закачка ведется из точечного источника, который заменяет длинный перфорационный интервал. Также в данной модели не пренебрегают краевыми эффектами [6, 10].
3. Модель PKN. Данная модель представляет собой трещину, которая растет в длину, оставаясь при этом постоянной по высоте. Фронт движения жидкости разрыва, как и фронт распространения трещины, является прямолинейным. По мере движения жидкости разрыва площадь поперечного сечения трещины уменьшается [11–14]. Принципиальное отличие данной модели от радиальной модели и модели KGD заключается в том, что в модели PKN раскрытие трещины в каждой ее точке зависит от давления, тогда как в KGD и радиальной моделях раскрытие зависит от распределения давления по всей трещине [6].

#### Методы исследования

Расчет параметров ГРП проводился по PKN модели, KGD модели и радиальной модели. Каждая модель в силу различной геометрии и различных начальных предположений распространения трещины описывается при помощи различных уравнений, приведенных в [5, 15, 16]. В рамках данной работы делается допущение о том, что при нагнетании жидкости разрыва в скважину отсутствуют фильтрационные утечки в пласт. Данное предположение допустимо, так как согласно одномерным моделям значительные объемы утечек наблюдаются, как правило, в высокопроницаемых коллекторах [5]. Данное месторождение относится к группе низкопроницаемых, согласно [1–3].

Для моделирования были выбраны скважины № 119, 724 и 728 с одностадийным ГРП на Ванкорском месторождении. Перечисленные скважины были выбраны по причине наиболее полных доступных по ним данных. Данные, необходимые для расчета моделей распространения трещин ГРП, приведены в табл. 2.

Вычисление производилось по формулам, представленным в работах [5, 15].

1) Модель PKN.

Длина трещины ГРП рассчитывалась по формуле (1) в соответствии с [9]:

$$x_f = 0,45 \left[ \frac{E'q^3}{\mu h^4} \right]^{1/5} t^{1/5}, \quad (1)$$

где  $x_f$  – длина трещины, м;  $E' = \frac{E}{1-\gamma}$  – модуль плоской деформации, Па;  $E$  – модуль упругости породы, Па;  $q$  – темп закачки жидкости разрыва, м<sup>3</sup>/с;  $\gamma$  – коэффициент Пуассона;  $\mu$  – вязкость закачиваемой жидкости, Па\*с;  $h$  – высота трещины, м;  $t$  – время закачки жидкости разрыва, с.

**Таблица 2.** Входные данные для моделирования трещины ГРП [1–3]

**Table 2.** Input data for hydraulic fracture modeling [1–3]

Параметр Parameter	Номер скважины Well number		
	119	724	728
Время закачки жидкости разрыва, с Fracture fluid injection time, s	15310		
Объем закачанной жидкости, м <sup>3</sup> Volume of injected liquid, m <sup>3</sup>	486,91	257,95	301,47
Вязкость закачиваемой жидкости, Па·с Viscosity of injected fluid, Pa·s	0,35		
Высота трещины, м/Fracture height, m	54,026	58,384	55,621
Модуль упругости горной породы, Па Rock elasticity modulus, Pa	27000000000		
Коэффициент Пуассона/Poisson's ratio	0,15		

Средняя раскрытость трещины ГРП рассчитывалась по формуле (2) в соответствии с [5]:

$$w = 1,91 \left[ \frac{q^2 \mu}{E' h} \right]^{1/6} t^{1/5}, \quad (2)$$

где  $w$  – средняя раскрытость трещины, м.

Эффективное давление (разность между давлением, с которым закачивается жидкость разрыва, и давлением смыкания) [17] рассчитывалось по формуле (3) в соответствии с [5]:

$$p_{ef} = 1,52 \left[ \frac{q^2 E' \mu}{h^6} \right]^{1/5} t^{1/5}, \quad (3)$$

где  $p_{ef}$  – эффективное давление, Па.

### 2) Модель KGD.

Длина трещины ГРП рассчитывалась по формуле (4) в соответствии с [5]:

$$x_f = 0,539 \left[ \frac{E' q^3}{\mu h^3} \right]^{1/6} t^{2/3}. \quad (4)$$

Средняя раскрытость трещины ГРП рассчитывалась по формуле (5) в соответствии с [5]:

$$w = 1,85 \left[ \frac{q^3 \mu}{E' h^3} \right]^{1/5} t^{1/3}. \quad (5)$$

Эффективное давление рассчитывалось по формуле (6) в соответствии с [5]:

$$p_{ef} = 1,09 [E' \mu]^{1/3} t^{-1/3}. \quad (6)$$

### 3) Радиальная модель.

Длина трещины ГРП рассчитывалась по формуле (7) в соответствии с [5]:

$$x_f = 0,572 \left[ \frac{E' q^3}{\mu} \right]^{1/9} t^{4/9}. \quad (7)$$

Средняя раскрытость трещины ГРП рассчитывалась по формуле (8) в соответствии с работой [5]:

$$w = 1,95 \left[ \frac{q^3 \mu^2}{E' t^2} \right]^{1/5} t^{1/3}. \quad (8)$$

Эффективное давление рассчитывалось по формуле (9) в соответствии с работой [5]:

$$p_{ef} = 2,51 [E' \mu]^{1/3} t^{-1/3}. \quad (9)$$

После расчетов параметров трещины согласно описанным выше моделям проводился расчет притока нефти после проведения операции ГРП. Расчет производился по формулам, описанным в работах [18–20]. Данные, необходимые для расчета притока нефти после проведения операции ГРП, приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Исходные данные для расчета притока нефти после операции ГРП [1–3]

**Table 3.** Initial data for calculating the oil inflow after hydraulic fracturing [1–3]

Параметр Parameter	Номер скважины Well number		
	119	724	728
Исходный дебит нефти, т/сут Initial oil production rate, t/day	134,1	24	44
Проницаемость пласта, мкм <sup>2</sup> Reservoir permeability, mcm <sup>2</sup>	0,0037		
Мощность пласта, м/Seam thickness, m	38		
Радиус контура питания скважин, м Well feed contour radius, m	318		
Радиус скважин, м/Well radius, m	0,0786	0,136	0,145

Расчет дебита производился по формуле (10) в соответствии с работами [18, 19]:

$$Q = Q_0 \frac{\ln \frac{R_c}{r_w}}{\ln \frac{R_c + S}{r_w}}, \quad (10)$$

где  $Q$  – дебит нефти после операции ГРП, т/сут;  $Q_0$  – дебит скважины до проведения операции ГРП, т/сут;  $R_c$  – радиус контура питания скважины, м;  $r_w$  – радиус горной выработки, м;  $S$  – скин-фактор (безразмерная величина, показывающая изменение проницаемости призабойной зоны пласта (ПЗП) в результате проведения операции ГРП).

Скин-фактор рассчитывался авторами по формуле (11), приведенной в работах [18, 19]:

$$S = -\ln \frac{l}{2r_w} + \int_1^\infty \frac{dn}{n(2nFcd+1)}, \quad (11)$$

где  $l$  – полудлина трещины ГРП, м;  $Fcd$  – безразмерная проводимость трещины ГРП.

Проводимость трещины рассчитывалась по формуле (12), приведенной в работах [18, 19]:

$$Fcd = \frac{k_2 \delta}{k_1 l'}, \quad (12)$$

где  $k_2$  – проницаемость трещины ГРП, м<sup>2</sup>;  $k_1$  – проницаемость призабойной зоны пласта (ПЗП), м<sup>2</sup>;  $\delta$  – ширина трещины ГРП, м.

Проницаемость трещины ГРП рассчитывается по формуле (13) в соответствии с работой [20]:

$$k_2 = \frac{w_1^2}{12}, \quad (13)$$

где  $w_1$  – остаточная раскрытость трещины, м.

Остаточная раскрытость трещины рассчитывается по формуле (14) в соответствии с работой [20]:

$$w_1 = \frac{wn}{1-m'}, \quad (14)$$

где  $n$  – объемная доля песка в жидкости разрыва, д. ед.;  $m$  – пористость трещин после закрытия, д. ед.

Проницаемость ПЗП рассчитывается по формуле (15) в соответствии с работой [20]:

$$k_1 = \frac{k_{пл}h_{пл}+w_1k_2}{h_{пл}+w_1}, \quad (15)$$

где  $k_{пл}$  – проницаемость пласта, м<sup>2</sup>;  $h_{пл}$  – мощность пласта, м.

### Результаты

В соответствии с формулами (1)–(15) были созданы две программы на языке программирования Python. Одна из них позволяет моделировать трещины ГРП в соответствии с основными моделями ГРП. Вторая позволяет моделировать приток нефти после проведения операции ГРП. Ниже приведены результаты работы данных программ.

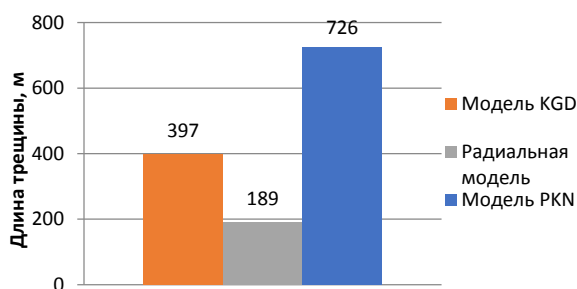
Результаты моделирования трещин ГРП в соответствии с тремя используемыми моделями распространения трещины приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Результаты моделирования распространения трещины

**Table 4.** Results of simulation of crack propagation

Параметр Parameter	Модель Model	Номер скважины Well number		
		119	724	728
Длина трещины, м Fracture length, m	PKN	916,535	588,367	671,611
	KGD	891,686	105,051	193,950
	Радиальная Radial	213,308	172,598	181,805
Раскрытость трещины, м Fracture opening, m	PKN	0,029	0,021	0,023
	KGD	0,004	0,003	0,003
	Радиальная Radial	0,013	0,010	0,011
Эффективное давление, Па Net pressure, Pa	PKN	4004200	2829575	3192058
	KGD	282675	282675	282675
	Радиальная Radial	650932	650932	650932

Для большей наглядности авторами приводятся диаграммы средних значений длины трещин, раскрытости трещин, эффективного давления трещин по всем рассчитанным моделям (рис. 1–3).

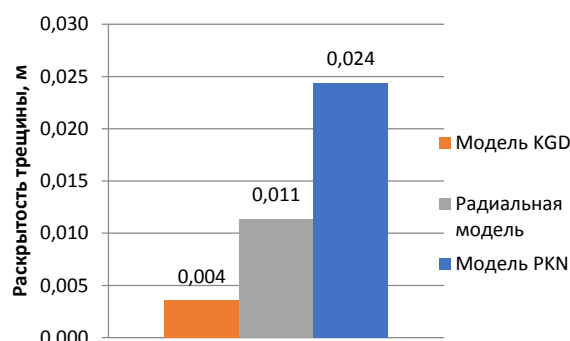


**Рис. 1.** Диаграмма средней по скважинам длины трещин по различным моделям

**Fig. 1.** Diagram of average fracture length for wells for various models

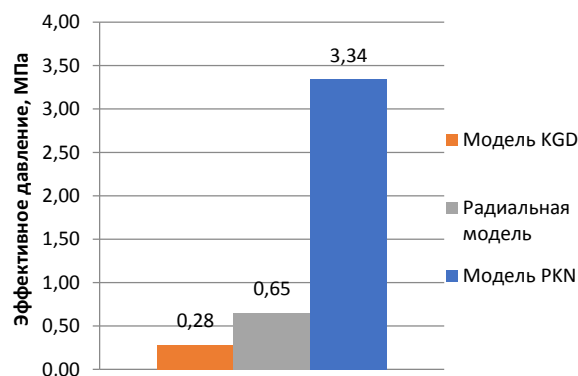
В дальнейшем моделировался приток нефти в скважину после проведения операции ГРП. Для моделирования притока использовались данные, полученные в моделировании распространения трещины

(табл. 4). Результаты моделирования притока нефти с использованием расчетных параметров трещины по трем моделям (PKN, KGD, радиальная) приведены в табл. 5.



**Рис. 2.** Диаграмма средней по скважинам раскрытости трещин по различным моделям

**Fig. 2.** Diagram of average fracture width for wells for various models



**Рис. 3.** Диаграмма среднего по скважинам эффективного давления трещин по различным моделям

**Fig. 3.** Diagram of average fracture net pressure for wells for various models

**Таблица 5.** Результаты моделирования притока нефти после проведения операции ГРП

**Table 5.** Results of modeling oil inflow after hydraulic fracturing

Параметр Parameter	Данные по дебиту Production data	Скважины/Wells		
		119	724	728
Дебит нефти после операции ГРП, т/сут Oil production rate after hydraulic fracturing, t/day	PKN	385,44	77,00	145,40
	KGD	384,83	60,38	125,22
	Радиальная Radial	340,12	66,02	123,90

### Обсуждение

При анализе результатов моделирования распространения трещин из первой программы по моделированию ГРП (рис. 1–3) авторами была отмечена закономерность. Она заключается в том, что все параметры трещин ГРП (длина трещин, раскрытость трещин, эффективное давление трещин), рассчитанные по модели KGD и радиальной модели, сильно отличаются от параметров трещин ГРП, рассчитанных по модели PKN (так, эффективное давление, рассчитанное по модели PKN, отличается на целый порядок от

эффективного давления, рассчитанного по радиальной модели и по модели KGD). Авторами выдвигается предположение о том, что данное отличие объясняется тем, что в радиальной модели и модели KGD раскрытие трещины зависит от распределения давления по всей трещине, тогда как в модели PKN раскрытие трещины в каждой ее точке зависит от конкретного значения давления.

По результатам работы второй программы полученные расчетные данные по притоку нефти были сравнены с практическими данными притока нефти по скважинам после проведения операции ГРП на месторождении. Сравнение практических и смоделированных данных по притоку нефти по всем скважинам представлены авторами на рис. 4. Практические данные по дебиту нефти после проведения операции ГРП были взяты из работ [1, 2].

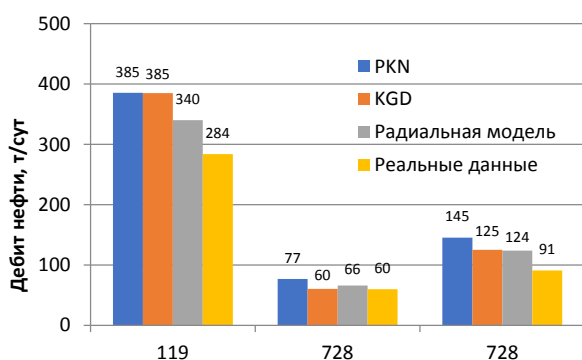


Рис. 4. Сравнение смоделированных данных по дебиту нефти после проведения операции ГРП и практических данных

Fig. 4. Comparison of simulated oil production data after hydraulic fracturing and practical data

Для оценки правильности расчетных данных авторами вычисляется сходимость расчетных и практических данных по формуле (16):

$$x = \left(1 - \frac{Q_{\text{реальн}} - Q_{\text{расч}}}{Q_{\text{реальн}}}\right) * 100 \%, \quad (16)$$

где  $x$  – сходимость практических и смоделированных значений, %;  $Q_{\text{реальн}}$  – практический дебит по всем скважинам, т/сут;  $Q_{\text{расч}}$  – расчетный дебит по всем скважинам, т/сут.

Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Наибольшей сходимостью в рамках Ванкорского нефтегазового месторождения практических и смоделированных данных притока нефти обладает радиальная модель.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безверхая Е.В., Носов С.А. Повышение продуктивности скважин на примере Ванкорского месторождения (Красноярский край) // Сибирский федеральный университет. – Красноярск: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский Федеральный Университет», Институт нефти и газа, 2016. – 76 с.
2. Нухаев М.Т., Козлов С.С. Анализ методов увеличения нефтеотдачи на Ванкорском нефтегазовом месторождении // Сибирский федеральный университет. – Красноярск: Федераль-

Таблица 6. Сходимость смоделированных и практических данных по дебиту нефти после проведения операции ГРП

Table 6. Convergence of simulated and practical data on oil production after hydraulic fracturing

Модель Model	Сходимость вычислений Convergence of calculations	Относительная погрешность вычислений Relative calculation error
	%	
PKN	60,3	39,7
KDG	68,9	31,1
Радиальная Radial	78,2	21,8

Расхождение смоделированных данных с практическими может быть обусловлено плохой геологической изученностью месторождения (возможно наличие непроницаемых пропластков в объекте Нх-1) [1, 2], также, вероятно, присутствовали утечки в пласт при проведении операции ГРП, которые не учитывались авторами в соответствии с выдвинутым предположением об отсутствии фильтрационных утечек в пласт. Кроме этого, по мнению ряда авторов [7, 11], одномерные модели обладают недостаточной точностью при описании трещин гидроразрыва пласта [7, 11].

Вместе с тем несомненным преимуществом одномерных моделей, в том числе использованных в настоящем исследовании, является простота их реализации и быстрота расчетов. В связи с этим, а также учитывая полученные результаты, радиальная модель и разработанная компьютерная программа для ее реализации могут служить в качестве инструмента предварительного анализа процесса развития ГРП при проектировании, также в рамках одномерных моделей можно добавить в программы фильтрационные утечки, благодаря чему сходимость может повыситься.

Для более точного описания процесса ГРП требуется применение компьютерных программ для двух- и трехмерных моделей распространения трещин, позволяющих получать более высокую сходимость практических и смоделированных данных, создание которых является направлением дальнейших исследований.

#### Вывод

В результате проделанной работы сделан вывод о том, что наибольшей сходимостью моделирования (среди одномерных моделей) распространения трещин ГРП обладает радиальная модель (сходимость смоделированных значений дебита с практическими составляет 78,2 %).

ное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский Федеральный Университет», Институт нефти и газа, 2017. – 77 с.

3. Анализ и перспективы эффективной разработки Ванкорского месторождения / Т.В. Всеволодов, М.В. Липаев, Р.Р. Мукминов, М.С. Сасина, Е.В. Егорова // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: XII Международная научно-практическая конференция. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2021. – С. 11–16.

4. Jennings A.R. Hydraulic fracturing applications enhanced well stimulation. – Tulsa: OGCI/PetroSkills Hydraulic Fracturing Applications, 2003. – 168 p.
5. Economides M., Oligney R., Valkó P. Unified fracture design (bridging the gap between theory and practice). – Texas: Orsa Press Alvin, 2004. – 316 p.
6. Математические модели гидроразрыва пласта / Д.В. Есипов, Д.С. Куранаков, В.Н. Лапин, С.Г. Чёрный // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – № 2. – С. 33–61.
7. Computer simulation of hydraulic fractures / J. Adachi, E. Siebrits, A. Peirce, J. Desroches // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2007. – V. 44. – P. 739–757.
8. Байкин А.Н. Динамика трещины гидроразрыва пласта в неоднородной поропругой среде: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2016. – 94 с.
9. Economides M.J. Modern fracturing – enhancing natural gas production. – Houston: Energy Tribune Publ. Inc., 2007. – 531 p.
10. Geertsma J., De Klerk F. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures // Journal of petroleum technology. – 1969. – V. 21. – Iss. 12. – P. 1571–1581.
11. Dontsov E.V., Peirce A.P. An enhanced pseudo-3D model for hydraulic fracturing accounting for viscous height growth, non-local elasticity, and lateral toughness // Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – V. 142. – P. 116–139.
12. Шляпкин А.С., Татосов А.В. О проведении экспресс-оценки геометрических параметров закрепленной на проппанте трещины гидроразрыва пласта методами математического моделирования // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2020. – Т. 6. – № 3 (23). – С. 79–92.
13. Jincai Zhang, Yushuai Zhang, Shangxian Yin PKN solution revisit: 3-D hydraulic fracture size and stress anisotropy effects // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2017. – V. 51. – P. 653–660.
14. Основы технологии гидравлического разрыва пластов / В.Г. Салимов, Ш.Ф. Тахаутдинов, А.В. Насыбуллин, О.В. Салимов. – Казань: Изд-во «Фэн» АН РТ, 2021. – 386 с.
15. Гнездов А.В. О точности расчётов параметров трещин при гидроразрыве пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 3. – С. 95–97.
16. Салимов В.Г., Насыбуллин А.В., Салимов О.В. Проектирование гидравлического разрыва пласта в системе Майера. – М.: Изд-во ОАО «ВНИИОЭНГ», 2008. – 156 с.
17. Barree R.D. A practical numerical simulator for three-dimensional fracture propagation in heterogeneous media // SPE Reservoir Simulation Symposium. – San Francisco, 1983. – № SPE-12273-MS. – P. 403–411.
18. Астафьев В.И., Федорченко Г.Д. Моделирование фильтрации жидкости при наличии трещины гидравлического разрыва пласта // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2007. – № 2 (15). – С. 128–132.
19. Кравченко М.Н., Пестриков А.В. Использование метода размерностей для решения класса задач о притоке к трещине ГРП // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М.Губкина. – 2010. – № 4. – С. 34–38.
20. Юмангуллова Н.З., Ганиева Г.Р., Минханов И.Ф. Эффективность проведения гидроразрыва пласта на Поточном месторождении // Нефтяная провинция. – 2021. – № 3 (27). – С. 95–111.

Поступила: 03.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 13.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Ямкин М.А.**, студент, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет.

**Сафиуллина Е.У.**, кандидат технических наук, доцент, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет.

UDC 622.276.66

## ASSESSMENT OF COMPLIANCE OF THE COMPUTER SIMULATION RESULTS OF LIQUID FLOW TO FRACTURE FORMATION WITH REAL DATA

**Maxim A. Yamkin**<sup>1</sup>,  
makson.yamkin@mail.ru

**Elena U. Safiullina**<sup>1</sup>,  
safiullinaeu@yandex.ru

<sup>1</sup> St. Petersburg Mining University,  
2, 21st lin. V.O., St. Petersburg, 199106, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to accurately calculate the parameters of hydraulic fracturing, which is used now more often as a method of intensifying the inflow, as well as a method of increasing oil recovery due to the fact that more often oil and gas reserves in various fields have become confined to hard-to-recover ones. Therefore, for the most accurate assessment of the effectiveness of hydraulic fracturing, it is necessary to choose a model that will describe hydraulic fracturing most accurately.

**The purpose** of this research is to analyze the main one-dimensional models of hydraulic fracturing, assess their convergence with real data and identify the most accurate model using data from the Vankor oil and gas field.

**Object:** one-dimensional models of hydraulic fracturing.

**Methods:** simulation of hydraulic fracturing in the Python programming language, followed by an assessment of the convergence of the simulated data with real data from the field.

**Results.** It was shown that the radial model of hydraulic fracturing had the highest convergence among the main one-dimensional models of hydraulic fracturing using data from the Vankor oil and gas field. The PKN (Perkins and Kern and Nordgren) model had a convergence of 60,3 %, the KGD (Khrstianovich and Zheltov and Geertsma and de-Klerk) model had a convergence of 68,9 % with real data from the field, and the radial model had a convergence of 78,2 % with real data. However, these models do not still describe hydraulic fracturing with convergence of 100 %. For this reason, the next aim of study is to increase the convergence of model that describes hydraulic fracturing and create two- and three-dimensional models.

**Conclusion.** It was determined that the radial model has the highest convergence among the main one-dimensional hydraulic fracturing models (convergence 78,2 %).

### Key words:

Oil inflow, hydraulic fracturing, model, PKN, KGD, radial model, hydraulic fractures.

### REFERENCES

- Bezverkhaya E.V., Nosov S.A. *Povyshenie produktivnosti skvazhin na primere Vankorskogo mestorozhdeniya (Krasnoyarskiy kray)* [Increasing well productivity on the example of the Vankor field (Krasnoyarsk Territory)]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2016. 76 p.
- Nukhaye V.M., Kozlov S.S. *Analiz metodov uvelicheniya nefteotdachi na Vankorskom neftegazovom mestorozhdenii* [Analysis of methods for enhanced oil recovery at the Vankor oil and gas field]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2017. 77 p.
- Vsevolodov T.V., Lipaev M.V., Mukminov R.R., Sasina M.S., Egorova E.V. *Analiz i perspektivy effektivnoy razrabotki Vankorskogo mestorozhdeniya* [Analysis and prospects for the effective development of the Vankor field]. *Noveyshie tekhnologii osvoeniya mestorozhdeniy uglevodorodnogo syrya i obespechenie bezopasnosti ekosistem Kaspiyskogo shelfa. XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [The latest technologies for the development of hydrocarbon deposits and ensuring the safety of the ecosystems of the Caspian shelf. XII International Scientific and Practical Conference]. Astrakhan, ASTU Publ. House, 2021. pp. 11–16.
- Jennings A.R. *Hydraulic fracturing applications*. Tulsa, OGCI/PetroSkills Hydraulic Fracturing Applications, 2003. 168 p.
- Economides M., Oligney R., Valkó P. *Unified fracture design (bridging the gap between theory and practice)*. Texas, Orsa Press Alvin, 2004. 316 p.
- Esipov D.V., Kuranakov D.S., Lapin V.N., Chorny S.G. *Mathematical models of hydraulic fracturing. Vychislitelnye tekhnologii*, 2014, vol. 19, no. 2, pp. 33–61. In Rus.
- Adachi J., Siebrits E., Peirce A., Desroches J. *Computer simulation of hydraulic fractures. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, vol. 44, pp. 739–757.
- Baykin A.N. *Dinamika treshchiny gidrorazryva plasta v neodnorodnoy porouprugoy srede*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Dynamics of hydraulic fracture in an inhomogeneous poroelastic medium. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2016. 94 p.
- Economides M.J. *Modern fracturing – enhancing natural gas production*. Houston, Energy Tribune Pub. Inc., 2007. 531 p.
- Geertsma J., De Klerk F. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures. *Journal of petroleum technology*, 1969, vol. 21, Iss. 12, pp. 1571–1581.
- Dontsov E.V., Peirce A.P. An enhanced pseudo-3D model for hydraulic fracturing accounting for viscous height growth, non-local elasticity, and lateral toughness. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, vol. 142, pp. 116–139.
- Shlyapkin A.S., Tatosov A.V. O velichine ekspress-otsenki geometricheskikh parametrov zakreplenny na proppante treshchiny gidrorazryva plasta metodom matematicheskogo modelirovaniya [On the value of the express-estimation of the geometric parameters of a hydraulic fracture fixed on the proppant by the method of mathematical modeling]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft, gaz, energetika*, 2020, vol. 6, no. 3 (23), pp. 79–92.
- Jincai Zhang, Yushuai Zhang, Shangxian Yin. PKN solution revisited: 3-D hydraulic fracture size and stress anisotropy effects. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, vol. 51, pp. 653–660.
- Salimov V.G., Takhautdinov Sh.F., Nasybullin A.V., Salimov O.V. *Osnovy tekhnologii gidravlicheskogo razryva plastov* [Fundamentals of hydraulic fracturing technology]. Kazan, Feng AN RT Publ., 2021. 386 p.
- Gnezdov A.B. O tochnosti raschetov parametrov treshchin pri gidrorazryve plasta [On the accuracy of calculations of fracture parameters during hydraulic fracturing]. *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten*, 2010, no. 3, pp. 95–97.
- Salimov V.G., Nasybullin A.V., Salimov O.V. *Proyektirovanie gidravlicheskogo razryva plasta v sisteme Mayera* [Design of hydraulic fracturing in the Mayer system]. Moscow, OAO «VNIIOENG» Publ., 2008. 156 p.



17. Barree R.D. A practical numerical simulator for three-dimensional fracture propagation in heterogeneous media. *SPE Reservoir Simulation Symposium*. San Francisco, 1983. no. SPE-12273-MS, pp. 403–411.
18. Astafyev V.I., Fedorchenko G.D. Modelirovanie filtratsii zhidkosti pri nalichii treshchiny gidravlicheskogo razryva plasta [Modeling of fluid filtration in the presence of a hydraulic fracture]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie Nauki*, 2007, no. 2 (15), pp. 128–132.
19. Kravchenko M.N., Pestrikov A.V. Ispolzovanie metoda razmer-nostey dlya resheniya klassa zadach o pritoke k treshchine GRP [Using the method of dimensions to solve a class of problems on the inflow to the hydraulic fracture]. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefi i gaza imeni I.M. Gubkina*, 2010, no. 4, pp. 34–38.
20. Yumangullova N.Z., Ganieva G.R., Minkhanov I.F. Efficiency of hydraulic fracturing at the Potochnoe field. *Neftyanaya provintsiya*, 2021, no. 3 (27), pp. 95–111. In Rus.

*Received: 3 November 2022.  
Reviewed: 13 December 2022.*

#### **Information about the authors**

**Maxim A. Yamkin**, student, St. Petersburg Mining University.

**Elena U. Safiullina**, Cand. Sc., associate professor, St. Petersburg Mining University.

УДК 622.279.76

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАКАЧКИ ВЯЗКОУПРУГИХ СОСТАВОВ В ПРОДУКТИВНЫЙ ПЛАСТ

Гасумов Рамиз Алиджавад оглы<sup>1</sup>,  
R.Gasumov@yandex.ru

Гасумов Эльдар Рамизович<sup>2,3</sup>,  
gasumov@me.com

<sup>1</sup> Северо-Кавказский федеральный университет,  
Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

<sup>2</sup> Азербайджанский университет нефти и промышленности,  
Азербайджан, AZ1010, г. Баку, пр. Свободы, 20.

<sup>3</sup> Азербайджанский технический университет,  
Азербайджан, AZ1148, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25.

**Актуальность.** Капитальный ремонт газоконденсатных скважин при аномально низких пластовых давлениях, где  $K_a < 0,2$ , представляет серьёзную проблему, учитывая, что глушение скважин с временным блокированием призабойной зоны пласта является важным этапом ремонта скважин. При этом особое значение имеет выбор состава, параметров жидкости глушения и технология их применения, позволяющая управлять гидродинамическими процессами в системе «скважина–пласт». Однако при сверхнизких значениях коэффициента аномальности пластового давления ( $K_a < 0,2$ ) глушение скважин и предотвращение поглощения жидкости глушения в пласт становятся серьёзной проблемой в связи с отсутствием соответствующих составов, имеющих низкие плотности, и способов управления гидродинамическими процессами в призабойной зоне пласта, отвечающих предъявляемым требованиям. В связи с чем компенсация величины недостаточной плотности жидкости глушения возможна за счёт её других реологических параметров, позволяющих управлять потоком жидкости в системе «скважина–пласт», путём создания необходимого «барьера» для блокирования призабойной зоны пласта. Использование метода математического моделирования закачки вязкоупругих составов в продуктивный пласт при глушении скважин при  $K_a < 0,2$  даёт возможность управления гидродинамическими процессами в призабойной зоне пласта и её блокирования. Это позволяет спроектировать процесс, оценить ожидаемые параметры технологического режима закачки вязкоупругих составов (давление на забое, расход жидкости, продолжительность процесса) в продуктивный пласт и внести необходимые коррективы с целью оптимизации технологических параметров для минимизации негативных последствий в процессе глушения скважин. Для оптимизации процесса принятия управленческих решений при ремонте скважин, сокращения времени и повышения результативности глушения скважин необходимо эффективное планирование применяемых технологий с инновационными подходами.

**Цель:** создание математической модели процесса закачки вязкоупругих составов при глушении скважин с аномально низкими пластовыми давлениями ( $K_a < 0,2$ ) и способа управления гидродинамическими процессами в призабойной зоне пласта для повышения эффективности разработки газоконденсатных месторождений в условиях значительного падения пластовых давлений.

**Объекты:** скважины газовых и газоконденсатных месторождений с аномально низкими пластовыми давлениями ( $K_a < 0,2$ ).

**Методы:** математическое моделирование. В качестве теоретической базы используются общие нестационарные уравнения сохранения массы и импульса фаз в газожидкостном потоке и уравнения фильтрации нефти и газа в пласте. Строится численная схема расчёта, основанная на методе конечных разностей. С её помощью проводятся многовариантные расчёты, результаты которых подвергаются анализу.

**Результаты.** Создана математическая модель, предназначенная для использования при глушении скважин с аномально низкими пластовыми давлениями, где  $K_a < 0,2$ , позволяющая разработать проект временной блокировки пласта и оценить предполагаемые параметры процесса закачки вязкоупругого состава (давление/расход, продолжительность). Разработанная модель может послужить основой для программного обеспечения, способного автоматически выполнять функции выбора оптимальных свойств блокирующего состава и режимов его закачки, исходя из критериев эффективного глушения и последующего освоения скважин.

### Ключевые слова:

газоконденсатная скважина, аномально низкие пластовые давления, глушение, блокирование призабойной зоны пласта, жидкости глушения, вязкоупругий состав, продуктивный пласт, математическая модель.

### Введение

Для повышения эффективности разработки газоконденсатных месторождений (ГКМ) в условиях значительного падения пластовых давлений возникает необходимость внедрения инновационных информационных технологий. Одной из важных задач проведения капитального ремонта скважин (КРС) является управление и оценка рисков внедрения инноваций при разработке ГКМ. В связи с чем, работа проводи-

лась на основе таких исследований, как сравнительный анализ, логическое обобщение и систематическая обработка результатов исследований. Для математического моделирования важно систематизировать подходы, предусматривающие элементы геологических, гидродинамических, инновационных процессов и технико-экономического анализа, позволяющие минимизировать производственные риски, улучшить экономические показатели и принять оперативное решение по управлению капитальным ремонтом

скважин. Актуальным также является анализ использования математического моделирования как инструмента менеджмента в повышении эффективности разработки ГKM за счёт быстрого развития эффективных цифровых технологий и технических средств, значительного расширения количества инновационных технологий и методов, используемых для управления гидродинамическими процессами в призабойной зоне пласта (ПЗП) скважины [1–3].

Для предотвращения поглощения жидкостей при глушении скважин в условиях аномально низких пластовых давлений (АНПД) с учётом наличия в блокируемом пласте высокопроницаемых пропластков перспективным является использование трёхэтапной схемы, включающей: выравнивание профиля приёмистости продуктивной толщи; закачку блокирующего состава; создание необходимой репрессии на пласт [4, 5].

#### Создание математической модели закачки вязкоупругих составов в пласт

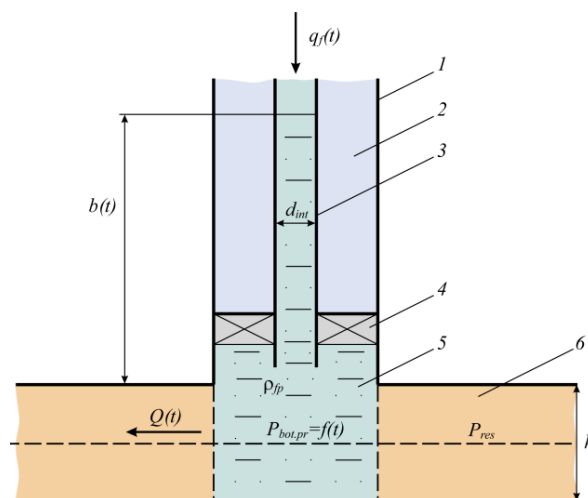
Построение математической модели процесса блокирования необходимо осуществлять с использованием трёхэтапной схемы проведения работ. В качестве модели можно принять коллектор как систему, количественно представляющую качественные геологические и физические свойства пласта, для использования в расчётах при управлении гидродинамическими процессами глушения скважин. Поскольку гидростатическое давление столба жидкости не зависит от площади и формы его сечения, с точки зрения расчёта давлений и сопутствующих параметров математическое моделирование проводилось на примере более сложного объекта исследования – скважин, оборудованных забойным пакером, с последующей экстраполяцией на конструкционно более простые объекты [6–8]. На каждом этапе выбирали разные виды жидкости глушения (ЖГ) с определённой динамической вязкостью и плотностью, а также различный контроль давления закачки и расчёт скорости подачи вязкоупругих составов (ВУС) в лифтовую колонну (рис. 1).

Регулирование скорости подачи ВУС в лифтовую колонну (ЛК) при глушении скважин для определённого временного отрезка позволяет контролировать зоны (глубины) проникновения жидкости в пласт и кольматации ПЗП [4, 5, 9]. Создание математической модели на первом этапе – блокирование ПЗП с закачкой ВУС проводилось в скважине, оборудованной пакерной схемой (рис. 1). Приёмистость пласта на определённый отрезок времени рассчитывали по формуле Дюпюи, при этом фильтрация при блокировании ПЗП подчиняется линейному закону Дарси:

$$Q(t) = \frac{2\pi kh[P_{inj1}(t) - P_{res}]}{\mu_f(t) \cdot \ln\left(\frac{r(t)}{R_w}\right)},$$

где  $r(t)$  – текущий радиус границы раздела «газ–ЖГ» закачки первой жидкости глушения, м;  $\mu_f(t)$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;  $R_w$  – радиус скважины, м;  $P_{inj1}(t)$  – давление закачки ЖГ, МПа;  $t$  – момент времени для расчёта;  $h$  – толщина

пласта, м;  $k$  – проницаемость, мД;  $Q(t)$  – приёмистость пласта, вызванная репрессией  $P_{inj1}(t) - P_{res}$ .



**Рис. 1.** Зависимость между параметрами закачки при блокировании призабойной зоны пласта:  $q_f(t)$  – объем закачиваемой жидкости в лифтовой колонне, м<sup>3</sup>;  $R_w$  – радиус скважины, м;  $P_{bot,pr}(t)$  – давление на забое скважины, МПа;  $P_{res}$  – пластовое давление, МПа;  $h$  – толщина пласта, м;  $b(t)$  – высота столба жидкости глушения в лифтовой колонне и забое скважины, м;  $d_{int}$  – внутренний диаметр лифтовой колонны, м;  $\rho_f$  – плотность жидкости глушения, кг/м<sup>3</sup>;  $Q(t)$  – приёмистость пласта, вызванная репрессией  $P_{bot,pr}(t) - P_{res}$ ; 1 – обсадная колонна; 2 – межтрубное пространство; 3 – лифтовая колонна; 4 – пакер; 5 – блокирующая жидкость; 6 – продуктивный пласт

**Fig. 1.** Dependence between injection parameters when blocking the bottomhole formation zone:  $q_f(t)$  is the volume of injected liquid in the tubing string, m<sup>3</sup>;  $R_w$  is the well radius, m;  $P_{bot,pr}(t)$  is the injection pressure of liquid gas, MPa;  $P_{res}$  is the formation pressure, MPa;  $h$  is the layer thickness, m;  $d_{int}$  is the height of the killing fluid column in the production string and the bottom of well, m;  $d_{int}$  is the inner diameter of the tubing string, m;  $\rho_f$  is the density of killing liquid, kg/m<sup>3</sup>;  $Q(t)$  is the reservoir injectivity caused by re-pression  $P_{bot,pr}(t) - P_{res}$ ; 1 is the casing string; 2 is the annular space; 3 is the lift column; 4 is the packer; 5 is the blocking fluid; 6 is the productive formation

В результате проникновения ЖГ и её фильтрации в ПЗП изменение естественной проницаемости пласта-коллектора не позволяет управлять гидродинамическими процессами в призабойной зоне из-за большой разницы между значениями гидростатического (гидродинамического) и пластового давления [10–12]. В результате скорость перемещения границы «газ–ЖГ» в процессе глушения скважин, с учётом пластового давления и несжимаемости ВУС, можно рассчитать по формуле

$$2\pi r(t)hm(1 - S_{rws})v_{ba}(r/t) = v_{fr}(t),$$

где  $v_{fr}(t)$  – скорость потока жидкости в ПЗП, л/мин;  $S_{rws}$  – остаточная водонасыщенность;  $m$  – пористость;  $b(t)$  – высота столба жидкости глушения в ЛК и забое скважины, м;  $v_{ba}(r/t)$  – скорость продвижения границы раздела «газ–ЖГ».

Давление закачки на текущий момент времени ( $t$ ) определяем, принимая  $P_{inj1}(t)=f(t)$

$$P_{inj1}(t) = f(t) = \rho_f g [b(t) + 0,5h].$$

В следующий момент времени ( $t+dt$ ) давление нагнетания будет определяться столбом жидкости

$$b(t+dt) + 0,5h = \left[ b(t) + \frac{db(t)}{dt} \cdot dt \right] + 0,5h,$$

$$P_{inj1}(t+dt) = f(t+dt) = \rho_f g \left[ b(t) + \frac{db(t)}{dt} \cdot dt + 0,5h \right],$$

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{dP_{закач1}(t)}{dt} = \rho_f g \frac{db(t)}{dt}.$$

Изменения высоты столба жидкости в ЛК влияют на изменение давления на забое скважины. За время  $dt$  определённый объём ЖГ  $Q(t) \cdot dt$  поступает в ПЗП, и высота столба жидкости уменьшается пропорционально этому объёму, в то же время объём жидкости  $q_f(t) \cdot dt$  заполняет заколонное пространство [13–16]. Таким образом, баланс объёма жидкости в лифтовой колонне из-за изменения высоты столба жидкости выглядит следующим образом:

$$V_f(t+dt) - V_f(t) = 0,25[\pi d_p^2 b(t+dt) - \pi d_p^2 b(t)] = 0,25\pi d_p^2 \frac{db(t)}{dt} \cdot dt,$$

$$V_f(t+dt) - V_f(t) = q_f(t)dt - Q(t) \cdot dt,$$

$$q_f(t) - Q(t) = 0,25\pi d_p^2 \frac{db(t)}{dt}.$$

Объём блокирующей жидкости в ЛК, соответствующий выбранному значению давления закачки ЖГ, определяется по формуле

$$q_f(t) = \frac{2\pi kh[P_{inj1}(t) - P_{res}]}{\mu_m(t)\ell n\left(\frac{r(t)}{R_w}\right)} + \frac{0,25\pi d_p^2}{\rho_f g} \frac{dP_{inj1}(t)}{dt}. \quad (1)$$

Данная формула (1) имеет важное практическое значение, поскольку известный дебит закачки используется для определения рабочего давления закачки, необходимого на первом этапе, при подаче ЖГ в ЛК. Особое значение имеет правильный выбор давления закачки ЖГ, позволяющий минимизировать радиус зоны загрязнения (кольматации) [1, 17–19]. Решив задачу минимизации радиуса зоны загрязнения (кольматации), можно управлять режимом подачи ЖГ в ЛК и рабочим давлением насоса. Для определения радиуса границы раздела «газ–жидкость» на этапе блокирования ПЗП, при условии  $r(0)=R_w$ , используем формулу:

$$0,5r^2(t)\ell n\left(\frac{r(t)}{R_w\sqrt{e}}\right) + 0,25R_w^2 = \frac{k}{m(1-S_{rws})} \int_0^t \frac{[P_{inj1}(t) - P_{res}]}{\mu_{ff}(t)} dt, \quad (2)$$

где  $r(T)$  – зона загрязнения (кольматации), м;  $\mu_{ff}(t)$  – коэффициенты динамической вязкости пенной жидкости, Па·с.

Уравнение (2) позволяет рассчитать радиусы зон кольматации, образующихся на первом этапе, для допустимого набора технически осуществимых изменений давления закачки [1, 9, 20]. Для определения безразмерных радиусов закупоренных зон в ПЗП после окончания второго этапа используем следующие обозначения:  $V_1=V_{gli}$  – объёмная скорость закачки пенной жидкости в ПЗП из первого этапа и  $Q_{gli}=Q_2$  – объём ВУС, закачиваемый в  $t$  времени в ПЗП на втором этапе, и формулу:

$$Q_2(t) = Q_{gli}(t) = \frac{2\pi kh[P_{inj2}(t) - P_{1-2}(t)]}{\mu_{f2}(t)\ell n\left(\frac{r_2(t)}{R_w}\right)}, \quad (3)$$

где  $P_{inj2}(t)$  – давление закачки ВУС, МПа;  $P_{1-2}(t)$  – давление на подвижной границе раздела двух жидких фаз.

В процессе глушения скважин ВУС поступает в ПЗП и продавливает пену (ранее закачанную) вглубь пласта. Объёмную скорость пенной системы можно определить по формуле

$$Q_1(t) = Q_{gli}(t) = \frac{2\pi kh[P_{1-2}(t) - P_{res}]}{\mu_{ff}(t)\ell n\left(\frac{r_1(t)}{r_2(t)}\right)}. \quad (4)$$

Используя закон сохранения объёма несжимаемой жидкости, можем рассмотреть следующие уравнения движения границ раздела фаз:

- «газ–пена»:

$$2\pi r_2(t)hm(1-S_{rws})\frac{dr_2}{dt} = Q_2(t) = Q_{gli}(t); \quad (5)$$

- «жидкость–жидкость»:

$$\pi hm(1-S_{rws})[r_1^2(t) - r_2^2(t)] = Q_1 = Q_{fli} = \text{const}. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) получаем уравнение для связи радиусами круговых границ:

$$r_1^2(t) = r_2^2(t) + \frac{V_1}{\pi hm(1-S_{rws})}.$$

Поскольку пенная система и ВУС несжимаемы, скорость движения объёма пены равна скорости движения объёма ВУС  $Q_1(t)=Q_{fli}(t)$ , поступающего в ПЗП. Учитывая равенство  $Q_1(t)=Q_{fli}(t)=Q_2(t)=Q_{gli}(t)$ , из уравнений (3)–(6) вытекает, что

$$\frac{P_{1-2}(t) - P_{res}}{\mu_{ff}(t)\ell n\left(\frac{r_1(t)}{r_2(t)}\right)} = \frac{P_{inj2}(t) - P_{1-2}(t)}{\mu_{f2}(t)\ell n\left(\frac{r_2(t)}{R_w}\right)}, \quad (7)$$

где  $\mu_{f2}(t)$  – коэффициенты динамической вязкости ВУС, закачиваемого на втором этапе;

$$F(t) = \frac{\mu_{ff}(t)\ell n\left(\frac{r_1(t)}{r_2(t)}\right)}{\mu_{f2}(t)\ell n\left(\frac{r_2(t)}{R_w}\right)}$$

и

$$f(t) = \mu_{ff}(t) \ln \left( \frac{r_1(t)}{r_2(t)} \right) + \mu_{f2}(t) \ln \left( \frac{r_2(t)}{R_w} \right).$$

Уравнение (7) можно преобразовать в:

$$P_{1-2}(t) = P_{res} \frac{[P_{res} + P_{inj2}(t)] F(t)}{1 + F(t)}.$$

Тогда объёмные скорости ЖГ в ПЗП примут одинаковый вид:

$$Q_1 = Q_2 = Q(t) = \frac{2\pi kh [P_{inj2}(t) - P_{res}]}{f(t)}.$$

Исходя из условий  $P_{inj2}(t) \geq P_{res}$  – заранее заданного давления закачки, необходимо выбрать скорость подачи ВУС  $v_{f2}(t)$  в лифтовую колонну (рис. 1).

$$v_{f2}(t) = Q(t) + \frac{\pi d_p^2}{4\rho_{f2}g} \frac{dP_{inj2}(t)}{dt} = \frac{2\pi kh [P_{inj2}(t) - P_{res}]}{f(t)} + \frac{\pi d_p^2}{4\rho_{f2}g} \frac{dP_{inj2}(t)}{dt}.$$

После алгебраических преобразований получается следующее дифференциальное уравнение для определения функции  $r_2(t)$ :

$$r_2(t) \frac{dr_2}{dt} = \frac{k}{m(1-S_{rws})} [P_{inj2}(t) - P_{res}] \frac{1}{\mu_{f1}(t) \ln \left( \sqrt{1 + \frac{V_1}{\pi h m (1-S_{rws}) r_2^2(t)}} \right) + \mu_{f2}(t) \ln \left( \frac{r_2(t)}{R_w} \right)}.$$

На третьем этапе для глушения скважины необходимо рассчитать время  $T$  блокирования ПЗП, объём ВУС  $V_{gf}$ , радиусы зоны загрязнения (кольматации)  $r_1(T)$  и  $r_2(T)$  при приёмистости  $Q(t)$  и давлении закачки  $P_{inj2}(t)$ , рассчитанных на втором этапе

$$\int_0^T Q(t) dt = \int_0^T \frac{2\pi kh [P_{inj2}(t) - P_{res}]}{\mu_{ff}(t) \ln \left( \frac{r_1(t)}{r_2(t)} \right) + \mu_{f2}(t) \ln \left( \frac{r_2(t)}{R_w} \right)} dt = V_{gf}.$$

Проведём тестовые расчёты при условии:  $r(T) = r_T$ ,  $P_{inj1}(t) = P_0 = \text{const}$ ,  $\mu_{f1}(t) = \mu_{f1} = \text{const}$ , где в качестве ЖГ используется метанол и этиловый спирт (табл. 1).

Радиусы границы раздела «газ–жидкость» на этапе блокирования ПЗП (ЖГ – метанол):

$$\frac{r^2}{2} \ln \left( \frac{r}{R_w \sqrt{e}} \right) + \frac{R_w^2}{4} = \frac{k(P_0 - P_{res})t}{m(1-S_{inj})\mu_m},$$

$$t = \frac{\mu_m m (1-S_{rws}) R_w^2 \left( r^2 \ln \left( \frac{r}{R_w \sqrt{e}} \right) + 0,5 R_w^2 \right)}{2k(P_0 - P_{res}) R_w^2}. \quad (8)$$

Учитывая, что множитель в формуле (8) имеет размерность времени, примем этот множитель в качестве базисной (масштабной) единицы измерения времени (а также для смешанной системы единиц, для расчёта базисной единицы времени) и обозначим как

$$\tau_0 = \frac{\mu_m m (1-S_{rws}) R_w^2}{k(P_0 - P_{res})} = \frac{98,04(\mu_m) m (1-S_{rws}) (R_w)_w^2}{k(P_0 - P_{res})},$$

$$\frac{t}{\tau_0} = 0,5\varphi(x),$$

где  $\varphi(x) = x^2 \ln \left( \frac{x}{\sqrt{e}} \right) + 0,5$ , а  $x = \frac{r}{R_w} \geq 1$ ,

так как

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 0,5\varphi(2) \cong 0,64,$$

$$\varphi(2) = 4 \ln \left( \frac{2}{\sqrt{e}} \right) + 0,5 = \ln \left( \frac{16}{e\sqrt{e}} \right) \cong 1,27.$$

Время  $\tau$  в смешанной системе единиц будет рассчитываться по формуле

$$\tau = \frac{\mu_m m (1-S_{rws}) R_w^2}{2k(P_0 - P_{res})} \ln \left( \frac{16}{e\sqrt{e}} \right) = \frac{62,38(\mu_m) m (1-S_{res}) (R_w)_w^2}{k(P_0 - P_{res})},$$

где  $x = r/R_w$ ,  $t/\tau = \varphi(x)/\varphi(2)$ .

Для расчёта продолжительности первой стадии, учитывая, что общий объём закачанной в ПЗП пенной жидкости равен  $V_{ff} = \pi(r_1^2 - R_w^2)hm(1-S_{rws})$ , находим безразмерный радиус ПЗП, заполненный пеной:

$$x_f = \sqrt{1 + \frac{10^4 V_{gli}}{\pi R_w^2 h m (1-S_{rws})}},$$

где  $h$  – толщина пласта-коллектора, м;  $t_1$  – время, необходимое на выполнение первого этапа, м/с;  $t_1/\tau = \varphi(x_f)/\varphi(2)$ .

Таблица 1. Исходные данные

Table 1. Initial data

Наименование параметра Parameter name	Обозначение Designation	Ед. изм. Unit	Значение Value
Радиус скважины/Well radius	$R_w$		0,122
Внутренний диаметр лифтовой колонны Inner diameter of the lift column	$d_{int}$	м/м	0,168
Толщина пласта/Formation thickness	$h$		10
Пористость/Porosity	$m$	с/м/с/м	0,12
Остаточная водонасыщенность Residual water saturation	$S_{rws}$	%	0,2
Проницаемость/Permeability	$k$	мД/мД	150
Динамическая вязкость первой жидкости (метанола), при 20 °С Dynamic viscosity of the first liquid (methanol), at 20 °С	$\mu_m$	Па·с Pa·s	0,578
Плотность метанола Methanol density	$\rho_m$	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	792,8
Динамическая вязкость второй жидкости (этилового спирта) при 20 °С Dynamic viscosity of the second fluid (ethyl alcohol) at 20 °С	$\mu_e$	Па·с Pa·s	1,2
Плотность этилового спирта Density of ethyl alcohol	$\rho_e$	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	789,3
Пластовое давление Formation pressure	$P_{res}$	Мпа MPa	5,0
Давление закачки/Injection pressure	$P_{inj}$		6,0

Расчёты показали, что продолжительность глушения скважин (блокирование ПЗП) и вязкость ЖГ влияют на радиус зоны загрязнения (кольматации) ПЗП, и позволили установить аппроксимирующие зависимости между этими показателями при  $P_{inj1}(t)=P_0=6$  МПа и  $P_{res}=5$  МПа [4, 14, 16, 20] (рис. 2).

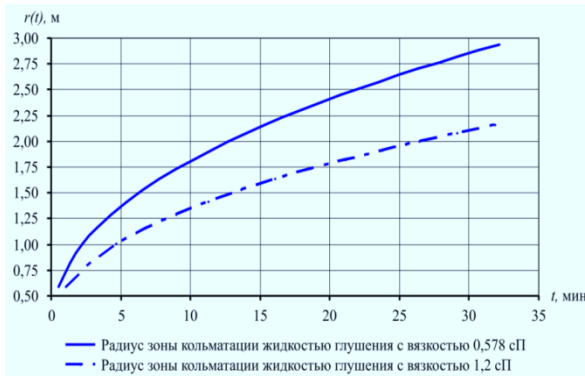


Рис. 2. Влияние продолжительности глушения скважин и вязкости жидкости глушения на радиус загрязнения пласта

Fig. 2. Influence of well killing duration and killing fluid viscosity on the formation contamination radius

Результаты расчётов по формуле

$$q_{f1}(t) = Q(t) = \frac{2\pi kh(P_0 - P_{res})}{\mu_m \ln\left(\frac{r(t)}{R_w}\right)} = \frac{2\pi kh(P_0 - P_{res})}{\mu_m \ln\left(\frac{at^b}{R_w}\right)}$$

в смешанной системе единиц с учётом данных табл. 2 приводят к следующему выражению для скорости подачи жидкости блокирования при постоянном давлении закачки  $P_{inj1}(t)=P_0$

$$q_{f1}(t) = \frac{0,38453094kh(P_0 - P_{res})}{\mu_m \ln\left[\frac{100at^b}{R_w}\right]}$$

Таблица 2. Уравнения зависимости

Table 2. Dependence equations

Вязкость жидкости глушения, Па·с Killing fluid viscosity, Pa·s		Расчётная формула для радиуса зоны кольматации Calculation formula for clogging zone radius
Первая жидкость глушения (метанол) First killing fluid (methanol)	0,585	$r(T)=aT^b=0,732T^{0,3971}$
Вторая жидкость глушения (этиловый спирт) Second killing fluid (ethyl alcohol)	1,200	$r(T)=aT^b=0,5567T^{0,3884}$

По результатам тестовых расчётов была построена графическая зависимость между скоростью подачи ЖГ и продолжительностью глушения скважин для двух видов жидкости (рис. 3, где  $P_{inj1}(t)=P_0=6$  МПа и  $P_{res}=5$  МПа) и найдены следующие аппроксимирующие уравнения:

$$q_{1m}(t) \cong \alpha_1 t^{-\beta_1} = 526,83t^{-0,1474},$$

$$q_{2e}(t) \cong \alpha_2 t^{-\beta_2} = 295,82t^{-0,1624}.$$

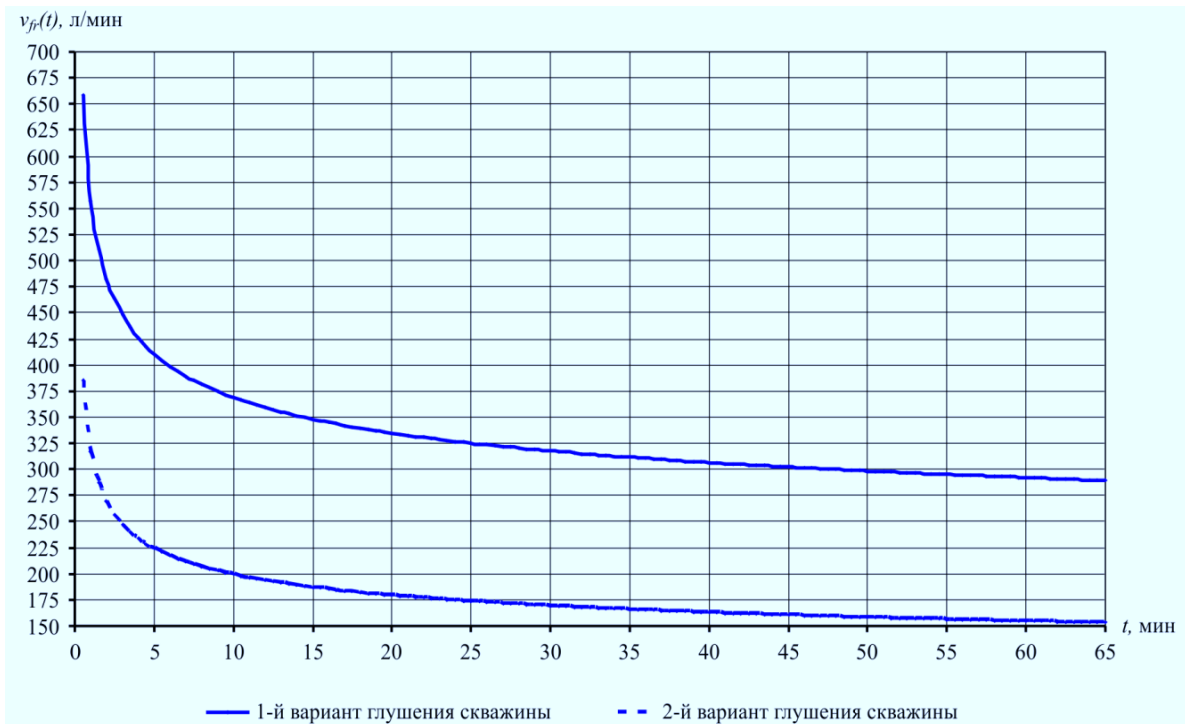


Рис. 3. Зависимость скорости подачи жидкости глушения от продолжительности глушения скважин:  $v_{f1}(t)$  – скорость подачи жидкости глушения в лифтовую колонну, л/мин;  $t$  – время закачки жидкости глушения, мин

Fig. 3. Dependence of the killing fluid supply rate on the duration of well killing:  $v_{f1}(t)$  is the rate of killing fluid supply to the production string;  $t$  is the injection time of the killing fluid

При глушении скважин (блокирование ПЗП) важным фактором является объем ЖГ, закачиваемый за определённый период времени [21–24]. Объем ЖГ ( $V$ ) может быть рассчитан как сумма объёма начального столба жидкости в ЛК ( $V_{0f}$ ) и на забое скважины, закачанного в процессе глушения ( $V_{1f}$ ):

$$V_{0f} = \pi h \left( R_w^2 - \frac{d^2}{8} \right) + \frac{\pi d^2 P_{inj}}{4 \rho_f g},$$

$$V_{1f} = 0,001 \int_0^{T(\text{мин})} q_{f2}(t) dt \cong \frac{\alpha T^{1-\beta}}{1000(1-\beta)}.$$

Радиус зоны загрязнения (кольматации) ПЗП при глушении скважин определяется как:

$$R_{pol} = \sqrt{\frac{V_f}{\pi h m(1-S_{rws})} + R_w^2}.$$

При этом можно оценить его погрешности  $\mu_m(t) = \mu_m = \text{const}$ , где  $P_{res}$  – пластовое давление;  $P_0 > P_{res}$  – начальное давление закачки жидкости глушения;  $\tau_{res}$  – время, при котором давление закачки снижается до пластового. С учётом значения коэффициента динамической вязкости уравнение (2) принимает вид:

$$0,25r^2 \ln \left( \frac{r}{R_w \sqrt{e}} \right) + R_w^2 = \frac{4k(P_0 - P_{res})}{m(1-S_{rws})\mu_m} \int_0^t \left( 1 - \frac{t}{\tau_{res}} \right) dt, \quad (9)$$

или после вычисления интеграла формула (9) имеет вид

$$0,25r^2 \ln \left( \frac{r}{R_w \sqrt{e}} \right) + R_w^2 = \frac{2k(P_0 - P_{res})\tau_{res}}{m(1-S_{rws})\mu_{m1}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{\tau_{res}} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

Из уравнения (10) в тексте нет такой формулы следует (где  $x=r/R_w$ ):

$$\frac{t}{\tau_{res}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{\mu_m m(1-S_{rws})R_w^2}{k(P_0 - P_{res})\tau_{res}} \left[ x^2 \ln \left( \frac{x}{\sqrt{e}} \right) + 0,5 \right]}.$$

### Результаты тестовых расчётов

Результаты тестовых расчётов с восемью возможными вариантами с техническими параметрами изложены в табл. 3.

Зависимость радиусов зоны загрязнения от продолжительности времени глушения скважины, установленная по результатам расчёта, представлена на рис. 4 (при давлении закачки и  $P_{res}=5$  МПа), где для каждого графика получены аппроксимационные уравнения в виде  $r(T)=aT^b$ , позволяющие определить радиусы зон загрязнения (табл. 3).

$$q_f(t) = \frac{2\pi kh \left[ P_0 - (P_0 - P_{res}) \frac{t}{\tau_{res}} - P_{res} \right]}{\mu_m \ln \left( \frac{at^b}{R_w} \right)} - \frac{\pi d_p^2 (P_0 - P_{res})}{4\rho_f g r_{res}}.$$

Если перейти к смешанной системе единиц, то получим:

$$q_f(t) = \frac{0,385kh \left[ P_0 - (P_0 - P_{res}) \frac{t}{\tau_{res}} - P_{res} \right]}{\mu_m \cdot \ln \left[ \frac{100at^b}{R_w} \right]} - \frac{80,088(d_p^2)(P_0 - P_{res})}{\rho_f r_{res}}.$$

Таблица 3. Варианты изменения давления закачки  
Table 3. Options for changing injection pressure

Параметр, характеризующий вариант Parameter characterizing the variant		Расчёт радиусов зоны кольматации при глушении скважины по линейному закону снижения давления закачки $P_{inj1}(t)$ от $P_0$ до $P_{res}$ за время $\tau_{res}$ Calculation of the radii of the clogging zone during well killing according to the linear law of injection pressure decrease $P_{inj1}(t)$ from $P_0$ to $P_{res}$ over time $\tau_{res}$						
Варианты/Options	Вязкость жидкости, Па·с Liquid viscosity, Pa·s	Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup> Liquid density, kg/m <sup>3</sup>	$P_0$ , МПа MPa	$P_{res}$ , МПа MPa	$\tau_{res}$ , мин min	$a$	$b$	Параметр аппроксимационных уравнений для расчёта радиусов зоны кольматации Parameter of approximation equations for calculating the radii of the clogging zone, $r(T)=aT^b$
								Коэффициент достоверности аппроксимации Approximation confidence factor $R^2$
1	0,58	792,8	7,0	5,0	480	0,7584	0,3699	0,9956
2	0,58	792,8	6,5	5,0	480	0,6816	0,3688	0,9958
3	0,58	792,8	6,0	5,0	480	0,5873	0,3664	0,9963
4	0,58	792,8	5,5	5,0	480	0,4619	0,3549	0,9971
5	1,2	789,3	7,0	5,0	480	0,5793	0,3661	0,9964
6	1,2	789,3	6,5	5,0	480	0,5224	0,3631	0,9968
7	1,2	789,3	6,0	5,0	480	0,4551	0,3554	0,9972
8	1,2	789,3	5,5	5,0	480	0,3617	0,3430	0,9970

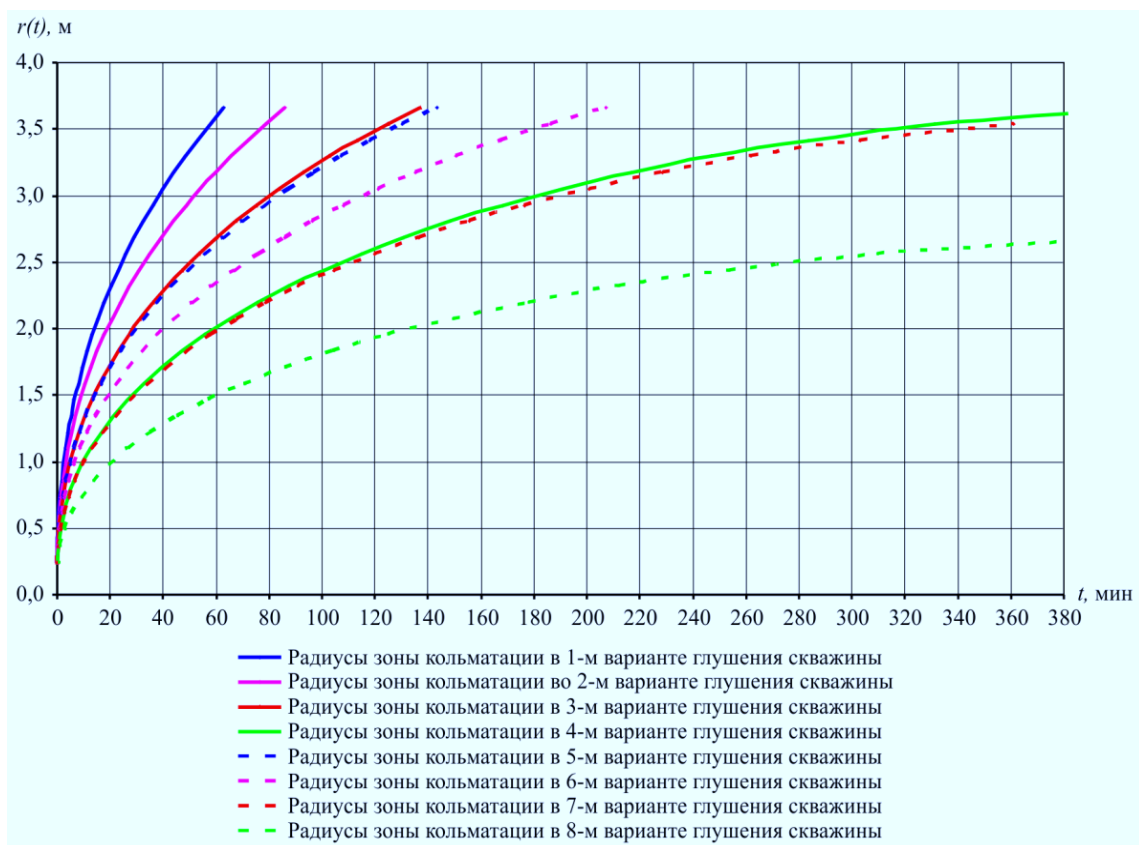
В соответствии с этой формулой были проведены тестовые расчёты, результаты которых представлены в виде графиков на рис. 4, 5 (при давлении закачки

$$P_{inj1}(t) = P_0 - (P_0 - P_{res}) \frac{t}{\tau_{res}} \text{ и } P_{res}=5 \text{ МПа}.$$

Объем ЖГ на забое скважины, закачанный в процессе глушения ( $V_{1f}$ ), после преобразования приобретает вид:

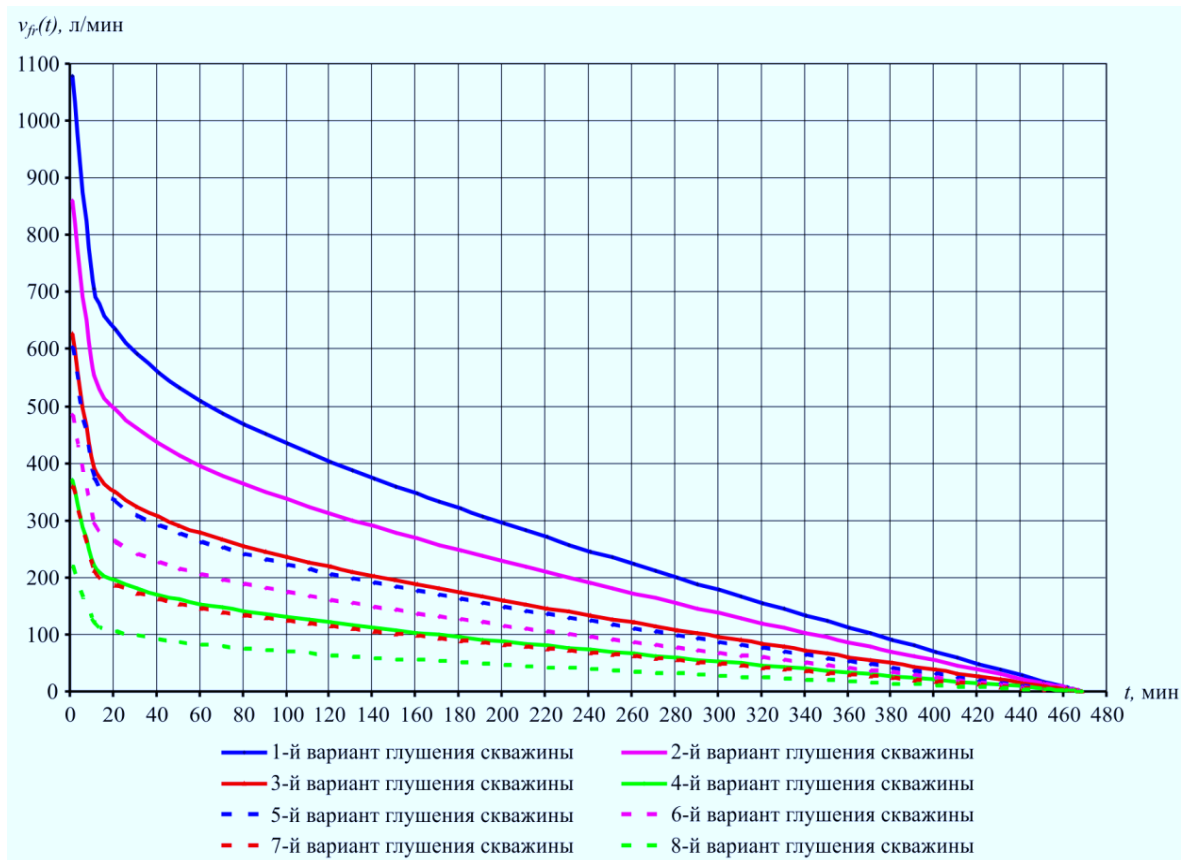
$$V_{f1} = 0,001 \int_0^T \left\{ \frac{2\pi kh \left[ P_0 - (P_0 - P_{res}) \frac{t}{\tau_{res}} - P_{res} \right]}{\mu_m \cdot \ln \left( \frac{at^b}{R_w} \right)} - \frac{\pi d_p^2 (P_0 - P_{res})}{4\rho_f g \tau_{res}} \right\} dt.$$

Результаты расчёта объёма ЖГ и радиусы зон загрязнения (кольматации) с использованием исходных данных приведены в табл. 4.



**Рис. 4.** Влияние продолжительности глушения скважин на радиус зоны загрязнения

**Fig. 4.** Influence of well killing duration on the radius of the contamination zone



**Рис. 5.** Влияние скорости подачи жидкости глушения на продолжительность глушения скважины

**Fig. 5.** Influence of killing fluid supply rate on well killing period



**Таблица 4.** Результаты расчётов объёмов жидкости глушения

**Table 4.** Results of calculations of killing fluid volumes

Расчётные показатели Estimated indicators	Жидкости глушения/Killing fluids							
	Первая жидкость глушения (за 468 мин) First killing fluid (for 468 min)				Вторая жидкость глушения (за 451 мин) Second kill fluid (for 451 min)			
	Варианты/Options							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Необходимый объём жидкости глушения, м <sup>3</sup> Required volume of killing fluid, m <sup>3</sup>	147,1	117,3	86,5	54,1	84,4	68,9	53,0	35,9
Радиусы зон загрязнения (кольматации), м Radii of contamination zones (colmatation), m	7,18	6,41	5,47	4,17	5,36	4,79	4,09	3,20

Несмотря на то, что использование численных методов аппроксимации и интегрирования приводит к расхождению в оценках радиусов зон загрязнения (кольматации), связанному с неизбежностью накопления ошибок округлений, математическая модель вполне приемлема для практического применения [3, 5, 25]. Предложенная математическая модель предназначена, в том числе, и для расчёта технологических параметров всех этапов блокирования ПЗП при глушении с использованием ВУС в качестве ЖГ и управлении гидродинамическими процессами в газоконденсатных скважинах.

### Заключение

Созданная математическая модель имеет практическое значение. Модель, предназначенная для использования при глушении скважин с АНПД, где  $K_a < 0,2$ , позволит разработать проект временной блокировки пласта и оценить предполагаемые параметры процесса закачки блокирующего состава – ВУС (давление/расход, продолжительность). Данная модель может послужить основой для программного обеспечения, способного автоматически выполнять функции выбора оптимальных свойств блокирующего состава и режимов его закачки, исходя из критериев эффективного глушения и последующего освоения скважин.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Математические модели расчета фильтрационных процессов на газоконденсатных месторождениях // О новой парадигме развития нефтегазовой геологии: Материалы Международной научно-практической конференции. – Казань, 2020. – С. 174–178.
2. Modeling of hydraulic fracture initiation and propagation in a mechanically stratified geologic system / K. Smart, G. Ofoegbu, K. Das, D. Basu, K. Smart // ARMA 2012-275/46th US Rock Mechanics Symposium. – Chicago, IL, June 24–27, 2012. – 9 p.
3. Gasumov R., Gasumov E. Innovative risk management for geological and technical (technological) // SOCAR Proceedings. – 2020. – № 2. – P. 8–16.
4. Окромелидзе Г.В., Некрасова И.Л., Гаршина О.В. Глушение скважин с использованием вязкоупругих составов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 56–61.
5. Redrovan P., Kuchin V., Dvoynikov M. Development of technology for increasing well completion during drilling in the abnormal reservoir pressures intervals // SHS Web of Conferences 84, 05001 (2020) Circumpolar Studies. – 2020. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20208405001> (дата обращения 15.07.2022).
6. Mahjoob M., Etemad S., Thibault J. Numerical study of non-Newtonian flow through rectangular microchannels // Iranian Journal of Chemical Engineering. – 2009. – V. 6. – № 4. (Autumn). – P. 44–61.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 100 с.
8. Каракетов А.В. Математическое моделирование процесса блокирования продуктивного пласта при проведении капитального ремонта скважин // Газовая промышленность. – 2020. – № 2 (796). – С. 96–102.
9. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Исследования технологического режима работы газовых скважин с однородным лифтом по критической скорости восходящего потока (на примере сеноманских залежей газовых месторождений Западной Сибири) // SOCAR Proceedings. – 2021. – № 1. – С. 97–103.
10. TACITE: a transient tool for multiphase pipeline and well simulation / C. Pauchon, H. Dhulesia, G. Binh Cirlot, J. Fabre // SPE Annual Technical Conference, SPE 28545. – Los Angeles, 1994. – P. 25–28.

11. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Особенности цифрового фильтрационного моделирования продуктивных залежей // Наука. Инновации. Технологии. Ставрополь. – 2021. – № 2. – С. 7–28.
12. Performances of transient two-phase flow models / D. Lopez, H. Dhulesia, E. Leporcher, P. Duchet-Suchaux // Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Texas, 1987. – P. 631–646. DOI: 10.2523/38813-ms.
13. Толпаев В.А., Ахмедов К.С. Математические модели прогнозирования производительности газовых скважин и их практическое значение // Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 2 (571). – С. 36–48.
14. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Mathematical modeling of the dynamics of viscoelastic pipelines with a flowing liquid // Young scientist. – 2015. – № 8 (88). – P. 19–24. URL: <https://moluch.ru/archive/88/17246/> (accessed: 28 July 2022).
15. Malanichev I.V., Akhmadiev F.G. Simulation of Non-Newtonian emulsion flows in microchannels // J Eng Phys Thermophy. – 2015. – V. 88. – P. 1483–1490. URL: <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1334-z> (accessed: 28 July 2022).
16. Azhikhanov N., Bisembayeva K., Zhunisov N. Mathematical model of fluid filtration to horizontal well in tight heterogeneous formation // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – V. 12. – № 1. – P. 201–211. URL: <http://www.rippublication.com> (дата обращения 15.07.2022).
17. Толпаев В.А., Ахмедов К.С. Математические модели прогнозирования дебитов скважин газовых месторождений // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития территорий: Сборник трудов II Международной научно-практической конференции, посвященной 10-летию Северо-Кавказского федерального университета. – Ставрополь, 2021. – С. 289–295.
18. Brill J.P., Mukherjee H. Multiphase flow in wells. – Richardson, Texas: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers Inc., 1999. – 384 p.
19. Толпаев В.А., Ахмедов К.С., Петросянц М.Т. Математические модели расчётов прогнозной производительности газовых скважин по кривым «дебит-накопленный отбор» // Ученые записки Забайкальского государственного университета. – 2020. – Т. 15. – № 3. – С. 19–37.
20. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Математическая модель для расчета процессов самозадавливания насосно-компрессорных труб жидкостью с помощью продувки скважин // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 8 (620). – С. 46–51.

21. Minami K., Shoham O. Transient two-phase flow behavior in pipelines-experiment and modeling // Int. J. of Multiphase Flows. – 2019. – V. 20. – № 4. – P. 739–752.
22. Vincent O.S., Charles A., Patrick S. Concerning the effect of a viscoelastic foundation on the dynamic stability of a pipeline system conveying an incompressible fluid // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2016. – V. 2. – № 2. – P. 96–117.
23. Salim P. H., Stanislav J.F. Evaluation of methods describing the flow of gas-liquid mixture in Wells // Pet. Tech. (January/February). – 1994. – V. 33. – P. 58–67. URL: <https://doi.org/10.2118/94-02-07> (дата обращения 15.07.2022).
24. Kuchin V., Dvoynikov M., Nutskova M. Isolation through a viscoelastic surfactant of a fracable hydrocarbon-containing formation // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1478 (1). – 012022.
25. Бондаренко А.В., Мардашов Д.В., Исламов Ш.Р. Оценка эффективности применения блокирующих полимерных составов при глушении нефтяных скважин в условиях карбонатного коллектора и высокого газового фактора // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. – № 1. – С. 53–64.

*Поступила: 29.07.2022 г.*

*Прошла рецензирование: 04.11.2022 г.*

#### **Информация об авторах**

**Гасумов Р.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры гидрогеомеханического моделирования Института «Наука о Земле» Северо-Кавказского федерального университета.

**Гасумов Э.Р.**, кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента. Азербайджанского университета нефти и промышленности; докторант Азербайджанского технического университета.

UDC 622.279.76

## MATHEMATICAL MODEL FOR INJECTING VISCOELASTIC COMPOSITIONS INTO THE PRODUCTIVE FORMATION

Ramiz A. Gasumov<sup>1</sup>,  
R.Gasumov@yandex.ru

Eldar R. Gasumov<sup>2,3</sup>,  
gasumov@me.com

<sup>1</sup> North Caucasian Federal University,  
1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russia.

<sup>2</sup> Azerbaijan University of Oil and Industry,  
20, Azadlig avenue, Baku, AZ1010, Azerbaijan.

<sup>3</sup> Azerbaijan Technical University,  
25, G. Javid Avenue, Baku, AZ 1148, Azerbaijan.

**Relevance.** Workover of gas condensate wells at abnormally low formation pressures, where  $K_a < 0,2$  is a serious problem considering that killing wells with temporary blocking of the bottomhole formation zone is an important stage in well repair. At the same time, the choice of the compositions and parameters of the killing fluid and the technology of their application, which allow controlling hydrodynamic processes in the «well-formation» system, is of particular importance. However, at ultra-low values of the formation pressure anomaly coefficient ( $K_a < 0,2$ ), killing wells and preventing the absorption of killing fluid into the formation become a serious problem due to the lack of appropriate compositions with low densities and methods for controlling hydrodynamic processes in the bottomhole formation zone that meet the requirements. Therefore the compensation of killing fluid insufficient density is possible due to its other rheological parameters, which allow controlling the fluid flow in the «well-formation» system by creating the necessary «barrier» to block the bottomhole formation zone. The use of the method of mathematical modeling for injecting viscoelastic compositions into the productive formation during well killing, with  $K_a < 0,2$ , makes it possible to control hydrodynamic processes in the bottomhole formation zone and block it. This allows designing the process, evaluating the expected parameters of the technological regime of viscoelastic compositions injection (bottomhole pressure, fluid flow, process duration) into the productive formation and making the necessary adjustments in order to optimize the technological parameters to minimize the negative consequences in well killing. To optimize the process of making managerial decisions during well workover, reduce the time and increase the effectiveness of well killing, it is necessary to effectively plan the technologies used with innovative approaches.

**Purpose:** making a mathematical model for viscoelastic compositions injection during well killing at abnormally low formation pressures ( $K_a < 0,2$ ) and a method for controlling hydrodynamic processes in the bottomhole formation zone to improve the efficiency of gas condensate fields development under conditions of a significant drop in reservoir pressure.

**Objects:** wells of gas and gas condensate fields with abnormally low formation pressures ( $K_a < 0,2$ ).

**Methods:** mathematical modeling. As a theoretical basis, the general non-stationary equations of conservation of mass and momentum of phases in a gas-liquid flow and the equations of oil and gas filtration in the formation are used. A numerical calculation scheme based on the finite difference method is constructed. With its help, multivariate calculations are carried out, the results of which are analyzed.

**Results.** A mathematical model has been made for use when killing wells with abnormally low formation pressures, where  $K_a < 0,2$ , which allows developing a temporary reservoir blocking project and evaluating the expected parameters of the viscoelastic composition injection (pressure/flow rate, duration). The developed model can serve as the basis for software that can automatically perform the functions of selecting the optimal properties of the blocking composition and its injection modes, based on the criteria for effective killing and subsequent development of wells.

### Key words:

gas condensate well, abnormally low formation pressures, killing, blocking the bottomhole formation zone, killing fluid, viscoelastic composition, productive formation, mathematical model.

### REFERENCES

- Gasumov R.A., Gasumov E.R. Matematicheskie modeli rascheta filtratsionnykh protsessov na gazokondensatnykh mestorozhdeniyakh [Mathematical models for calculating filtration processes in gas condensate fields]. *O novoy paradigme razvitiya neftegazovoy geologii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [On a new paradigm for the development of oil and gas geology. Proc. of the International Scientific and Practical Conference]. Kazan, Ikhlas Publ., 2020. pp. 174–178.
- Smart K., Ofoegbu G., Das K., Basu D., Smart K. Modeling of hydraulic fracture initiation and propagation in a mechanically stratified geologic system. *ARMA 2012-275/46th US Rock Mechanics Symposium*. Chicago, IL, June 24–27, 2012. 9 p.
- Gasumov R., Gasumov E. Innovative risk management for geological and technical (technological). *SOCAR Proceedings*, 2020, no. 2, pp. 8–16.
- Okromelidze G.V., Nekrasova I.L., Garshina O.V. Killing wells using viscoelastic compositions. *Oil industry*, 2016, no. 10, pp. 56–61. In Rus.
- Redrovan P., Kuchin V., Dvoynikov M. Development of technology for increasing well completion during drilling in the abnormal reservoir pressures intervals. *SHS Web of Conferences 84, 05001 (2020) Circumpolar Studies*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20208405001> (accessed 15 July 2022).
- Mahjoob M., Etemad S., Thibault J. Numerical study of non-Newtonian flow through rectangular microchannels. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 2009, vol. 6, no. 4 (Autumn), pp. 44–61.
- Loitsyansky L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 100 p.
- Karaketov A.V. Mathematical modeling of the process of blocking the productive formation during workover of wells. *Gas industry*, 2020, no. 2 (796), pp. 96–102. In Rus.

9. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Issledovaniya tekhnologicheskogo rezhima raboty gazovykh skvazhin s odnorodnym liftom po kriticheskoy skorosti voskhodyashchego potoka (na primere senomanskikh zalezhey gazovykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri) [Study of the technological regime of operation of gas wells with a uniform lift according to the critical speed of the upward flow (by example of the Cenomanian deposits of gas fields in Western Siberia)]. *SOCAR Proceedings*, 2021, no. 1, pp. 97–103.
10. Pauchon C., Dhulesia H., Binh Cirlot G., Fabre J. TACITE: a transient tool for multiphase pipeline and well simulation. *SPE Annual Technical Conference*, SPE 28545. Los Angeles, 1994. pp. 25–28.
11. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Features of digital filtration modeling of productive deposits. *Nauka. Innovation. Technology*, 2021, no. 2, pp. 7–28. In Rus.
12. Lopez D., Dhulesia H., Leporcher E., Duchet-Suchaux P. Performances of transient two-phase flow models. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Texas, 1987. pp. 631–646. DOI: 10.2523/38813-ms.
13. Tolpaev V.A., Akhmedov K.S. Mathematical models for predicting the productivity of gas wells and their practical significance. *Automation, telemechanization and communication in the oil industry*, 2021, no. 2 (571), pp. 36–48. In Rus.
14. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Mathematical modeling of the dynamics of viscoelastic pipelines with a flowing liquid. *Young scientist*, 2015, no. 8 (88), pp. 19–24. Available at: <https://moluch.ru/archive/88/17246/> (accessed: 28 July 2022).
15. Malanichev I.V., Akhmediev F.G. Simulation of non-Newtonian emulsion flows in microchannels. *J Eng Phys Thermophy*, 2015, vol. 88, pp. 1483–1490. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1334-z> (accessed 15 July 2022).
16. Azhikhanov N., Bisembaeva K., Zhunissov N. Mathematical model of fluid filtration to horizontal well in tight heterogeneous formation. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 201–211. Available at: <http://www.ripublication.com> (accessed: 28 July 2022).
17. Tolpaev V.A., Akhmedov K.S. Matematicheskie modeli prognozirovaniya debitov skvazhin gazovykh mestorozhdeniy [Mathematical models for predicting well flow rates of gas fields]. *Innovatsionnye tekhnologii v neftegazovoy otrasli. Problemy ustoychivogo razvitiya territory. Sbornik trudov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 10-letiyu Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta* [Innovative technologies in the oil and gas industry. Problems of Sustainable Development of Territories: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 10th Anniversary of the North Caucasus Federal University]. Stavropol, 2021. pp. 289–295.
18. Brill J.P., Mukherjee H. *Multiphase flow in wells*. Richardson, Texas, Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers Inc., 1999. 384 p.
19. Tolpaev V.A., Akhmedov K.S., Petrosyants M.T. Mathematical models for calculating the predicted productivity of gas wells according to the curves «debit-cumulative recovery». *Scientific notes of the Zabaikalsky State University*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 19–37. In Rus.
20. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Mathematical model for calculating the processes of self-clamping of tubing with liquid using well blowing. *Oilfield business*, 2020, no. 8 (620), pp. 46–51. In Rus.
21. Minami K., Shoham O. Transient two-phase flow behavior in pipelines-experiment and modeling. *Int. J. of Multiphase Flows*, 1994, vol. 20, no. 4, pp. 739–752.
22. Vincent O.S., Charles A., Patrick S. Concerning the effect of a viscoelastic foundation on the dynamic stability of a pipeline system conveying an incompressible fluid. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 96–117.
23. Salim P. H., Stanislav J.F. Evaluation of methods describing the flow of gas-liquid mixture in Wells. *Pet. Tech. (January/February)*, 1994, vol. 33, pp. 58–67. Available at: <https://doi.org/10.2118/94-02-07> (accessed 15 July 2022).
24. Kuchin V., Dvoynikov M., Nutskova M. Isolation through a viscoelastic surfactant of a fracable hydrocarbon-containing formation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1478 (1), 012022.
25. Bondarenko A. V., Mardashov D. V., Islamov Sh. R. Evaluation of effectiveness of the use of blocking polymer compositions when killing oil wells in a carbonate reservoir at high gas factor. *Oil and Gas Business*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 53–64. In Rus.

Received: 29 July 2022.  
Reviewed: 4 November 2022.

#### Information about the authors

**Ramiz A. Gasumov**, Dr. Sc., professor, North Caucasian Federal University.

**Eldar R. Gasumov**, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan University of Oil and Industry; doctoral candidate, Azerbaijan Technical University.

УДК 614.751-026.86(571.17)

## СОДЕРЖАНИЕ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УЛИЧНОЙ ПЫЛИ И ОЦЕНКА РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА (МЕЖДУРЕЧЕНСК, ЮЖНЫЙ КУЗБАСС)

Осипова Нина Александровна<sup>1</sup>,  
osipova@tpu.ru

Осипов Константин Юрьевич<sup>2</sup>,  
osipov@iao.ru

Таловская Анна Валерьевна<sup>1</sup>,  
talovskaj@yandex.ru

Язиков Егор Григорьевич<sup>1</sup>,  
yazikoveg@tpu.ru

Филимоненко Екатерина Анатольевна<sup>3</sup>,  
filimonenkoea@mail.ru

Новиков Сергей Автономович<sup>1</sup>,  
nsa@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

<sup>3</sup> Тюменский Государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, пр. Ленина, 25.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью прогнозных оценок влияния тяжелых металлов и некоторых других элементов, накапливающихся в уличной пыли городов, на здоровье населения.

**Цель:** установление элементного состава уличной пыли и оценка риска здоровью от воздействия токсичных элементов, накапливающихся в уличной пыли регионов многопрофильной промышленности, в том числе активной угледобычи и углепереработки (г. Междуреченск, Южный Кузбасс); определение величины канцерогенного и неканцерогенного риска здоровью населения.

**Объекты:** материал уличной пыли, полученный путем отбора проб (29) по равномерной сети.

**Методы:** метод отбора проб уличной пыли посредством сита; выделение гранулометрической фракции менее 1 мм методом просеивания; определение гранулометрического состава и размера пылевых частиц (SALD-7101 SHIMADZU с полупроводниковым лазером); метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, NexION 300D для определения содержания 57 элементов в пробах; методы оценки риска воздействия химических веществ на здоровье человека.

**Результаты.** Уличная пыль изученной территории обогащена Fe (7,5), As (4,8), Sb (4,0), Ag (2,7), Pb (2,1), Cu (1,3), Ti (1,29) относительно кларка верхней части континентальной земной коры. В скобках приведены факторы обогащения, рассматриваются только те элементы, которые вошли в перечень для оценки риска. Превышение средних содержаний ряда элементов в уличной пыли над кларковыми значениями, в отдельных точках очень существенное, может быть связано с воздействием автотранспорта (Pb), металлообрабатывающих предприятий (Fe, Ti, Cr), продуктов сгорания угля (As, Hg), дальним переносом от угледобывающих предприятий, переносом воздушных потоков через массы вскрышных и вмещающих пород (Cr, Cu, Sb). Экологические риски здоровью населения от воздействия компонентов уличной пыли (учтены 26 элементов по данным масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой) оценены с учетом перорального, ингаляционного и кожного путей поступления и использованием стандартных факторов экспозиции. В порядке уменьшения значений суммарных коэффициентов опасности (неканцерогенный риск), учитывающих все три пути поступления загрязнителей, элементы образуют следующий ряд: As ( $1,6 \times 10^{-1}$ ) > Cr ( $4,1 \times 10^{-2}$ ) > Pb ( $2,4 \times 10^{-2}$ ) > Mn ( $2,2 \times 10^{-2}$ ) > Sb ( $1,5 \times 10^{-2}$ ) > Ba ( $1,4 \times 10^{-2}$ ) > Al ( $8,6 \times 10^{-3}$ ) > Cu ( $4,4 \times 10^{-3}$ ) > Co ( $1,7 \times 10^{-3}$ ) > Cd ( $1,7 \times 10^{-3}$ ) > Zn ( $1,0 \times 10^{-3}$ ) > Hg ( $2,2 \times 10^{-4}$ );  $\Sigma$  КО (неканц) =  $29,4 \times 10^{-2}$ . Данный уровень риска характеризуется как приемлемый (допустимый риск); именно на этом уровне установлено большинство зарубежных и рекомендуемых международными организациями гигиенических нормативов для населения в целом. Однако проблема длительного воздействия малых доз токсичных элементов на здоровье населения также требует своего изучения. По уменьшению уровня канцерогенного риска элементы образуют следующий ряд: As ( $3,0 \times 10^{-5}$ ) > Cr (VI) ( $2,7 \times 10^{-5}$ ) > Be ( $4,3 \times 10^{-6}$ ) > Pb ( $1,6 \times 10^{-6}$ ) > Cd ( $1,2 \times 10^{-7}$ ). Значения, лежащие в интервале более  $1 \times 10^{-6}$ , но менее  $1 \times 10^{-4}$ , расцениваются как предельно допустимый риск. Данные уровни подлежат постоянному контролю. В некоторых случаях при таких уровнях риска могут проводиться дополнительные мероприятия по их снижению. Сопоставление показателей риска и геохимических характеристик уличной пыли указывает на необходимость учета эколого-геохимических особенностей депонирующих сред при интерпретации результатов оценки рисков.

### Ключевые слова:

Уличная пыль, тяжелые металлы, ингаляционный риск, канцерогенный риск, неканцерогенный риск, угольная энергетика.

## Введение

Оценка риска для здоровья человека – крупное, активное развиваемое и востребованное научное направление [1–4]. Для оценки риска здоровью широко применяются зарубежные и отечественные общепризнанные методики и руководства [5–8].

В последние годы за рубежом и в России выполнены важные научно-практические исследования по оценке канцерогенного и неканцерогенного риска здоровью при хроническом поступлении химических веществ для жителей крупных промышленных городов, антропогенно-нарушенных территорий, районов экологических бедствий, районов интенсивной добычи минерально-сырьевых ресурсов [9–13].

В настоящее время концепция оценки риска практически во всех странах мира и международных организациях рассматривается в качестве главного механизма разработки и принятия управленческих решений как на международном, государственном или региональном уровнях, так и на уровне отдельного производства или другого потенциального источника загрязнения окружающей среды. Методология оценки риска применяется при внедрении показателей наилучших доступных технологий для контролирования безопасности здоровья населения после применения новых методов регулирования выбросов.

В практику оценки рисков для населения все больше входит метод оценки жизненного цикла, один из ведущих инструментов экологического менеджмента в Европейском союзе. В частности, модель USE TOX [14], признанная мировым научным сообществом, позволяет отслеживать величину и значимость воздействия на окружающую среду и человеческий организм. Разработан новый подход, позволяющий рассчитать уровни условного токсического воздействия промышленных предприятий на человека и экосистемы с использованием методик оценки жизненного цикла и биогеохимических исследований [15]. Модифицированный характеристический коэффициент токсичности, предложенный в [16], позволил проранжировать локальные территории России и Казахстана по степени токсичности отдельных элементов в составе организмов млекопитающих.

Для оценки риска здоровью широко применяются данные о состоянии атмосферного воздуха с учетом международно признанных принципов [17]. Наряду с этим, не меньший интерес для этих же целей представляет использование геохимических данных о содержании загрязнителей в депонирующих средах, в частности в дорожной пыли [10, 12, 13, 18–21].

Действительно, уличная пыль представляет собой объект, позволяющий узнать общий геохимический состав атмосферного воздуха исследуемой территории, с высокой точностью выявить содержание примесей и вредных для здоровья химических элементов, предоставляет возможность анализировать и сортировать ее по многим показателям, оценить риски для здоровья человека. Новые данные по составу уличной пыли получены в последние годы в российских городах и

регионах: Восточный округ и некоторые районы Москвы [22–24], Стойло-Лебединский горнодобывающий комплекс [25], северные районы Западной Сибири [12, 26], Пермская область [27], Урал [10]. За исключением этих работ исследования уличной пыли в РФ пока не носят систематического характера, сведения довольно разрозненны.

Учет содержаний элементов, определяемых в геохимических исследованиях, при оценке риска создает эффективную модель потенциальных рисков при условии изменения их содержаний в динамике и в пространстве. Нашим коллективом развивается методология оценки риска в сочетании с геохимическим подходом в условиях антропогенеза Сибири, исходными данными для расчетов служат содержания элементов в депонирующих средах: твердом осадке снега [28, 29], почвах [30], в настоящей статье – в уличной пыли.

Представляется важным оценивать риски влияния на здоровье человека токсичных элементов, выделяющихся при работе промышленных предприятий различного профиля. Данная задача становится еще более актуальной при рассмотрении городских территорий, подвергаемых воздействию угольной промышленности. Добыча и транспортировка угля, генерация энергии на угольных электростанциях, начиная с момента получения угля и заканчивая окончательной утилизацией отходов от сжигания угля, приводит к значительному загрязнению окружающей среды, образованию существенных объемов пылевых выбросов [31–36]. Токсичные элементы вместе с пылью выделяются при движении транспортных средств, при обработке летучей золы, выбрасываются через дымовые трубы, что приводит к повреждению растений и болезням людей и животных, представляют опасность для окружающей среды как в непосредственной близости от объектов угледобычи, так и на расстоянии [37–40].

В 1992 г. коллективом кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета начались эколого-геохимические исследования территории города Междуреченска Кемеровской области [41].

Интерес к изучению этого объекта в плане сформулированных выше задач обусловлен функционированием вблизи города (3–12 км) крупных российских угледобывающих предприятий с открытой (угольные разрезы) и закрытой (шахты) добычей угля. Крупнейшими угольными объединениями города являются: ЗАО «Распадская угольная компания», ОАО «Междуречье», ОАО «Южный Кузбасс» [42]. Промышленность г. Междуреченска характеризуется многоотраслевой структурой, угольная отрасль является градообразующей. В структуре промышленного производства на долю предприятий, осуществляющих добычу и переработку полезных ископаемых (в основном каменный уголь), приходится 90 %.

Междуреченский городской округ занял третье место (после Новокузнецкого района и г. Новокузнецк) среди муниципальных образований Кемеровской области по объему вредных выбросов в воздух

(168,8 тысяч тонн, или 10,5 % общего объема, 2021 г. [43]).

В структуре общей заболеваемости жителей города Междуреченска, по данным ГБУЗ «Междуреченская городская больница», 2020 г. [44] болезни органов дыхания составляют 26,1 %, болезни системы кровообращения – 15,8 %, болезни костно-мышечной системы – 8,6 %, на четвертом месте травмы и отравления – 7,7 %, злокачественные новообразования занимают пятое место – 1,7 %.

Ранее проведенные на территории города атмо- и литогеохимические исследования [41] выявили неоднородный мозаичный характер распределения содержания большинства элементов в составе почв, что связано с геологическими предпосылками расположения шахт и разрезов вокруг города, без какого-либо компактного сосредоточения. Содержание с 1992 по 2015 гг. ряда элементов осталось на прежнем уровне (Ba, Zn, Co), некоторых элементов повысилось (Cr в 1,6, As в 2 раза).

Что касается атмогеохимических исследований, также проведенных ранее, можно констатировать, что уровень полевой нагрузки снизился с 363 кг/(км<sup>2</sup>×сут.) до 122 кг/(км<sup>2</sup>×сут.). Однако площадь, охваченная пробоотбором, значительно меньше в современный период наблюдений. Пространственное распределение загрязнителей в твердом осадке снега выглядит более контрастно: ореолы запыления вытянуты от от-

крытых угольных шахт и разрезов в соответствии с преобладающим направлением ветров. Сейчас продолжают исследования уличной пыли.

Таким образом, целью настоящей работы явилось изучение элементного состава уличной пыли в городе Междуреченске и оценка риска для здоровья на основе полученных геохимических данных.

#### Объекты и методы исследования

Всего было отобрано 29 проб уличной пыли (рис. 1). На каждом участке отбора проб образец пыли отбирали из пяти–восьми точек краев дороги или тротуара путем подметания пластиковой щеткой и сбора в чистый лоток, а затем тщательным перемешивали для получения образца пылевой смеси массой ~500 г [22, 23]. Фактические координаты широты и долготы каждого места отбора проб были записаны глобальной системой позиционирования (GPS). Все образцы пыли были собраны таким образом в сухой сезон июля 2020 г. и запечатаны в полиэтиленовые пакеты. Образцы пыли подвергались естественной сушке на воздухе в условиях вентиляции, темноты и комнатной температуры в лаборатории в течение не менее двух недель, просеиванию с использованием сита для получения пылевой фракции 1 мм. Вся обработка проводилась без контакта с металлами, чтобы избежать перекрестного загрязнения.

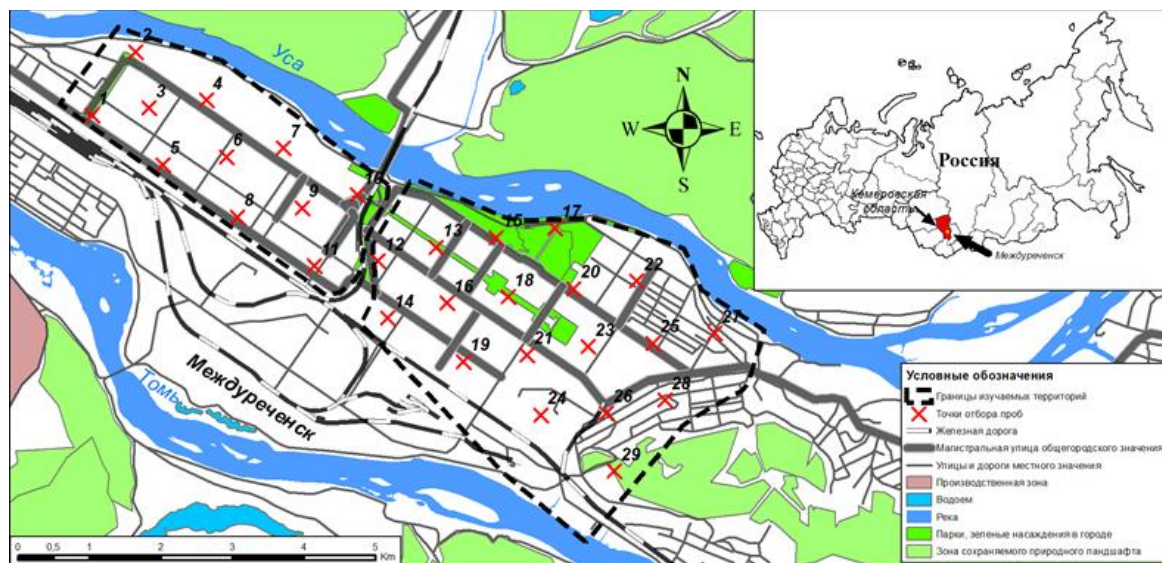


Рис. 1. Карта-схема отбора проб

Fig. 1. Diagrammatic map of dust sample locations

Исследования вещественного и гранулометрического состава проб уличной пыли выполнены на оборудовании в лабораториях Центра коллективного пользования ТПУ.

Вещественный состав проб изучен на бинокулярном микроскопе в лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» (отделение геологии ТПУ). Лазерно-дифракционный метод применен для изучения гранулометрического состава проб на приборе SALD-7101 фирмы SHIMADZU (Япония) с полупроводниковым

лазером (длина волны 375 нм, выход 10 мВт) в НОЦ «Наноцентр». Навеска каждой пробы помещалась в ванну смесителя с дистиллированной водой и в течение 5 мин диспергировалась при помощи ультразвуковой установки (40 Вт, 40 кГц).

Методом ИСП-МС с пробоподготовкой [45] в предварительно измельченных на виброистирателе пробах определено содержание 57 химических элементов на приборе ИСП-масс-спектрометр ELAN в ХАЦ «Плазма» (г. Томск, аттестат аккредитации

RA.RU.516895 от 05.05.2016 г., с использованием стандартных образцов сравнения.)

Статистические показатели содержаний химических элементов в пробах определяли в программе «Statistica», расчеты показателей риска – в специально созданной программе для ЭВМ «Расчет показателей риска здоровью населения на основе эколого-геохимических данных» [46].

Для оценки степени обогащения уличной пыли химическими элементами и определения их происхождения рассчитывали фактор обогащения (ФО) [22, 23] относительно кларка земной коры [47] и содержания элементов в почвогрунтах изучаемой территории:

$$FO = (C/C_{норм})_{проба} / (C/C_{норм})_{земн. кора(почвогрунты)},$$

где  $C$  и  $C_{норм}$  – содержания изучаемого и нормирующего элемента, соответственно, в пробе, земной коре или почвогрунтах. В качестве нормирующего элемента, который не должен поступать из антропогенных

источников, в нашем исследовании использовали титан. Если значения ФО более 1, это указывает на антропогенные источники химических элементов, а менее 1 – на литогенную природу элементов.

Оценка риска для здоровья от воздействия компонентов уличной пыли Be, Mg, Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Sb, Ba, Hg, Pb проводилась согласно [6, 7]. Критерием отбора этих элементов послужило наличие токсикологической информации, сведений о референтных концентрациях и дозах при пероральном, ингаляционном, кожном поступлении [48, 49]. Учитывались три пути поступления пылевых частиц в организм: проглатывание частиц пыли (пероральный путь), вдыхание взвешенных частиц пыли через рот и нос (ингаляционный путь) и кожное поглощение металлов частицами (дермальный путь). Использовались коэффициенты поглощения и выброса частиц, разработанные для почвы [9].

**Таблица 1.** Стандартные факторы экспозиции, используемые при расчете дозы, и их варибельность

**Table 1.** Standard exposure factors used in dose calculation and their variability

Стандартные факторы экспозиции Standart exposure factors	Тип распределения Distribution	Значение (доверительный интервал) Value (confidence interval)
PEF – фактор эмиссии пылевых частиц dust particle emission factor	–	$1,36 \cdot 10^9$
$R_{инг}$ – объем воздуха, поступающего в сутки в организм взрослого человека, м <sup>3</sup> /день daily incoming air volume in the adult body, m <sup>3</sup> /day	–	$20 \pm 4$
$V$ – суточное пероральное поступление почвы в организм взрослого человека, мг/день daily oral intake of soil into the body of an adult, mg/day	–	100
$SA$ – площадь кожи, подвергшейся воздействию, см <sup>2</sup> exposed skin area, cm <sup>2</sup>	–	5700
$SL$ – фактор адгезии, мг/см <sup>2</sup> /adhesion factor, mg/cm <sup>2</sup>	–	0,07
$ABS$ – фактор кожной адсорбции/skin adsorption factor	–	0,001
$EF$ – частота воздействия, дней/год exposure frequency, day/year	Триангулярное Triangular	350 (180–365)
$ED$ – продолжительность воздействия, лет exposure duration, year	Логнормальное Lognormal	30 (19–43)
$BW$ – масса тела взрослого человека, кг adult body weight, kg	Логнормальное Lognormal	70 (55–80)
$AT$ – период осреднения экспозиции, лет average time, year	Точечное Point	30 (70*)
$C_{эл}$ – концентрация элемента в почве, мг/кг element contents, mg/kg	Нормальное Normal	$C_{эл} \pm SD$

*SD* – стандартное отклонение/standard deviation; \*значение для канцерогенов/value for cancerogenic agents.

Суммарный индекс опасности по каждому элементу рассчитывался как сумма коэффициентов опасности (КО) перорального ( $КО_{пер}$ ), ингаляционного ( $КО_{инг}$ ) и дермального ( $КО_{дерм}$ ) воздействия для каждого элемента:

$$КО = КО_{пер} + КО_{инг} + КО_{дерм}$$

Коэффициент опасности перорального воздействия  $КО_{пер}$  оценивался как отношение среднесуточной дозы ( $LADD_{пер}$ ) к референтной при пероральном поступлении ( $RfD_{пер}$ ):

$$КО_{пер} = \frac{LADD_{пер}}{RfD_{пер}}$$

Среднесуточная доза при пероральном поступлении ( $LADD_{пер}$ ) каждого элемента вместе с почвой рассчитывалась по формуле:

$$LADD_{пер} = \frac{C_{эл} \times V \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365} \times 10^{-6},$$

где  $LADD_{пер}$  – среднесуточная доза при пероральном поступлении в течение жизни для неканцерогенного воздействия, мг/(кг×сутки); стандартные факторы экспозиции приведены в табл. 1.

Коэффициент опасности кожного воздействия  $КО_{дерм}$  оценивался как отношение среднесуточной дозы к референтной при поступлении через кожу ( $RfD_{дерм}$ ):

$$КО_{дерм} = \frac{LADD_{дерм}}{RfD_{дерм}}$$

Среднесуточная доза при поступлении каждого элемента вместе с почвой через кожу  $LADD_{дерм}$ , мг/(кг×сутки) рассчитывалась по формуле:

$$LADD_{дерм} = \frac{C_{эл} \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}.$$

Коэффициент опасности ингаляционного хронического воздействия  $КО_{инг}$  рассчитывался как отно-



шение среднесуточной дозы  $LADD_{инг}$  к референтной при ингаляционном поступлении ( $RfD_{инг}$ ):

$$KO_{инг} = \frac{LADD_{инг}}{RfD_{инг}}$$

Среднесуточная доза при ингаляционном поступлении каждого элемента с уличной пылью рассчитывалась по формуле:

$$LADD_{инг} = \frac{C_{эл} \times R_{инг} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT \times 365}$$

Канцерогенный риск при пероральном и ингаляционном поступлении рассчитывался по формулам:

$$R_{инд.канц.пер.} = LADD'_{(пер)} \times SF_0;$$

$$R_{инд.канц.инг.} = LADD'_{(инг)} \times SF_1,$$

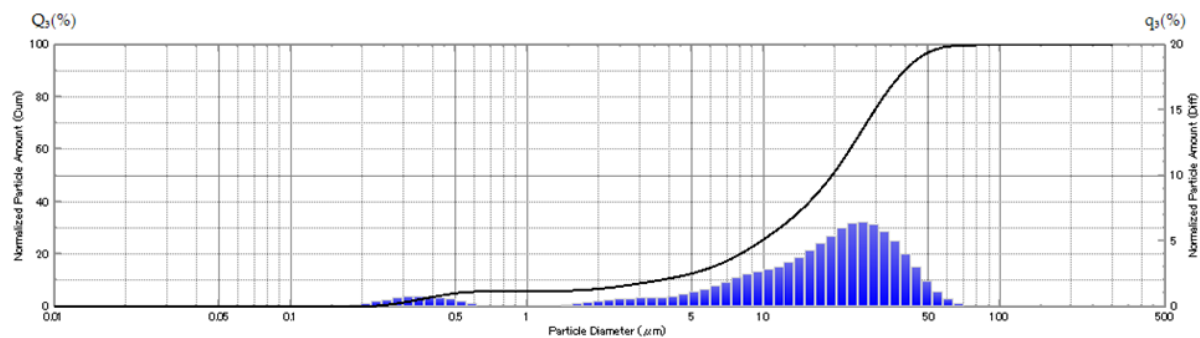
где  $SF_0$ ,  $SF_1$  – факторы канцерогенного потенциала при пероральном и ингаляционном поступлении, соответственно [6],  $мг/(кг \times сут.)^{-1}$ .

$LADD'_{(пер)}$ ,  $LADD'_{(инг)}$  рассчитывались по тем же формулам, что и при расчете неканцерогенных рисков, но период осреднения экспозиции берется равным 70 годам (табл. 1).

## Результаты и их обсуждение

В пробах уличной пыли исследуемой территории содержатся такие минералы, как кварц, альбит, микролин и кальцит (5–35 %). Компоненты антропогенного происхождения представлены угольной пылью (15–30 %), стеклом (2–5 %) и частицами асфальта (2–7 %). По результатам ситового разделения проб уличной пыли на фракции более 1 мм и менее 1 мм установлено, что в составе уличной пыли на территории г. Междуреченска преобладает фракция менее 1 мм. Определено, что доля фракции частиц менее 1 мм изменяется от 62 до 93,3 при среднем 79,3 %, тогда как доля фракции более 1 мм – от 6,7 до 38 при среднем 20,7 %. В пробах из западной части города фракция менее 1 мм варьирует от 60 до 92 при среднем 77,7 %, а в восточной части – от 70 до 93,3 при среднем 80,2 %.

Метод лазерной дифракции показал, что размер частиц в пробах уличной пыли изменяется в широком диапазоне – от 0,1 до 131,5 мкм. Распределение частиц для городских проб уличной пыли по размерам представлено на рис. 2.



**Рис. 2.** Кумулятивная и дифференциальная кривые распределения частиц по размерам в пробе уличной пыли г. Междуреченска по данным метода лазерной дифракции

**Fig. 2.** Cumulative and differential curves of particle size distribution in the samples of Mezhdurechensk street dust according to the laser diffraction method

Средний диаметр частиц в пробах с территории города варьирует от 7,3 до 21,1 мкм, при среднем значении  $15,0 \pm 0,5$  мкм. В пробах, отобранных в западной части города, средний размер частиц составляет  $12,4 \pm 0,6$  мкм, а в восточной части –  $16,7 \pm 0,5$  мкм.

Пробы уличной пыли города содержат 10 % частиц с размером 2,7 мкм, 50 % частиц с размером 15 мкм, 90 % частиц с размером 35,2 мкм. Гранулометрический состав частиц в городских пробах представлен преимущественно средним и крупным классами частиц: доля PM1 составляет в среднем 6,7 %, PM1-10 – 29,2 %, PM10-50 – 60,7 %, PM>50 – 3,4 %.

Максимальная доля PM1 (20,6 %) приходится на пробу из района расположения автовокзала (западная часть города), что может указывать на их поступление с выхлопами автотранспорта. В пробах, отобранных на окраине юго-восточной части города, доля мелкой фракции (PM1) изменяется от 5 до 16 %, что, вероятно, может свидетельствовать о дальнем ветровом переносе мелкодисперсной фракции угольной пыли от близрасположенных угольных разрезов и во время транспортировки добытого угля в этой части города.

Содержания химических элементов, включая группу макроэлементов (Na, Ca, Fe, Ti, Mn, Al, Si, K, P) и микроэлементов, таких как тяжелые металлы 1, 2, 3 класса опасности, редкие, редкоземельные и радиоактивные элементы, в валовых пробах уличной пыли, варьируют в широких пределах (рис. 3). По значениям коэффициента вариации ( $V > 75$  %) неравномерное распределение ( $V > 75$  %) характерно для Pb, неравномерное ( $V = 40-75$  %) – для V, Ni, Be, Ge, As, Se, Mo, In, Sb, Sn и Bi, что может указывать на наличие геохимических аномалий на территории города, сформированных под воздействием локальных источников загрязнения.

По значениям ФО, рассчитанного относительно кларка земной коры, городская уличная пыль существенно обогащена Cu, Zn, Ge, As, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Sb, Pb, Ca (ФО от 1,4 до 4,8) (рис. 4), что может быть связано с воздействием автотранспорта, ремонтных мастерских на территории города и дальним переносом от угледобывающих предприятий. Содержание большей части рассматриваемых элементов, в т. ч. макроэлементов, редких, редкоземельных и радиоактивных

элементов, в пробах близко к кларкам земной коры, что, вероятно, свидетельствует о поступлении этих элементов в составе частиц горных пород и угля вследствие дальнего переноса от буровзрывных работ на близрасположенных угледобывающих месторождениях.

Вмещающие породы на месторождениях содержат минералы группы силикатов и алюмосиликатов. По данным [50], угли Кузнецкого бассейна в качестве примесей содержат группу таких микроэлементов, как редкие, редкоземельные и радиоактивные.

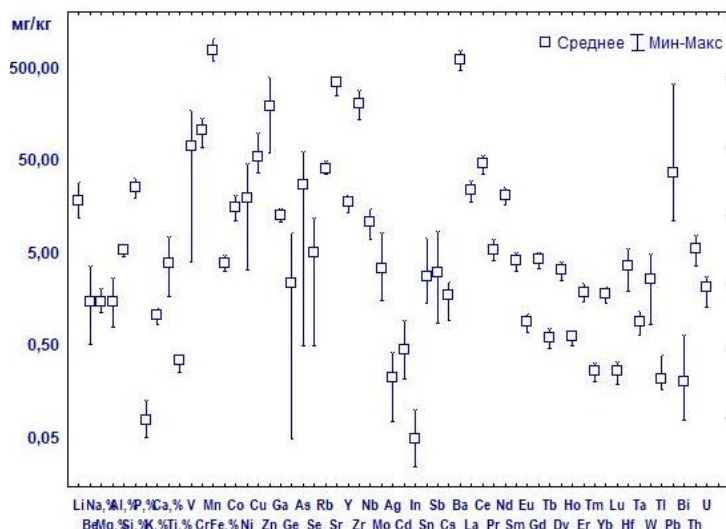


Рис. 3. Разброс содержаний элементов в уличной пыли г. Междуреченска

Fig. 3. Spread of the contents of elements in the street dust of Mezhdurechensk

Вышеописанные предположения об источниках химических элементов могут быть подтверждены значениями факторов обогащения, рассчитанными относительно содержания элементов в почвогрунтах города (рис. 4). Городская уличная пыль относительно почвогрунтов существенно обогащена (ФО от 1,4 до 3,7) Na, Mg, Al, Ca, Sr, Mo, Ag, Ba, W, Th Rb, Zr, Cs и группой редкоземельных элементов (Ge, Y, In, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf), что может указывать на такой источник поступления как дальний перенос пылевых выбросов от уг-

ледобывающих месторождений. Обогащение проб уличной пыли макроэлементами может быть связано не только с почвенной составляющей и составом частиц горных пород, но и с абразией бордюрного камня. При производстве этого материала используется портландцемент, содержащий в значительном количестве кальций. Проведенные нами исследования снегового покрова в районе расположения цементного завода в Кемеровской области показали высокие концентрации кальция в твердой фазе снега и в составе производимой продукции – портландцементе [51].

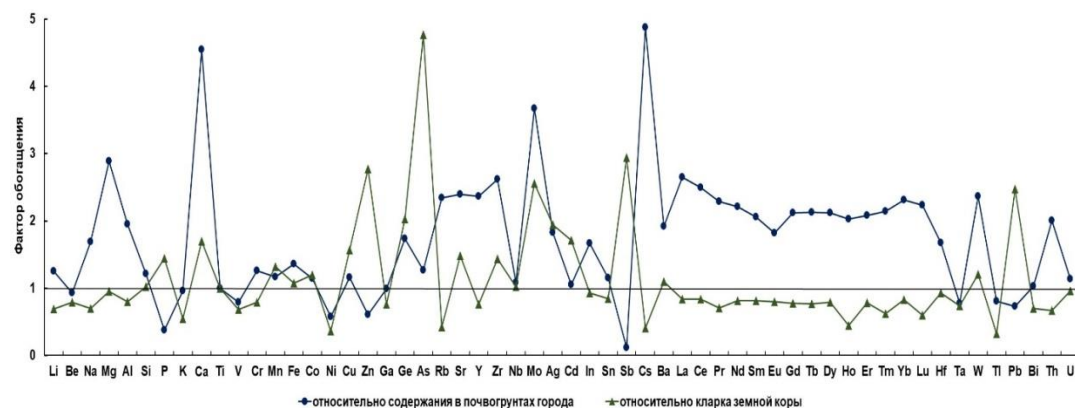


Рис. 4. Факторы обогащения элементов в уличной пыли относительно содержаний в почвогрунтах и кларка земной коры

Fig. 4. Factors of enrichment of elements in street dust relative to the contents in soils and clark of the Earth's crust

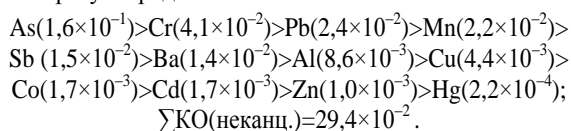
Содержание химических элементов, близкое к содержанию в почвогрунтах по значениям ФО, может свидетельствовать об их поступлении вследствие выдувания частиц почвогрунтов, в которых продукты техногенеза накапливаются и хранятся долговременно.

Среднесуточные дозы металлов оценивались по минимальным, максимальным, средним значениям и верхней границе 95 % доверительного интервала для среднего значения (95 % UCL). Они приведены в табл. 2. Обсуждение полученных значений доз необходимо проводить в совокупности с анализом производ-



Результаты расчета коэффициентов опасности для оценки неканцерогенных эффектов воздействия рассматриваемых металлов на организм человека при трех путях поступления приведены в табл. 3. Значения коэффициентов опасности для большинства элементов изменяются в широком диапазоне для разных металлов – от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  при пероральном поступлении, от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$  при дермальном поступлении, от  $10^{-8}$  до  $10^{-2}$  при ингаляционном поступлении.

По уменьшению суммарного КО (неканц.) элементы образуют ряд



Сравнение проведено по верхней границе 95 % доверительного интервала для среднего значения. Коэффициенты ингаляционного воздействия менее 0,1 принято считать неопасными согласно существующим критериям приемлемости риска. С этой точки зрения только мышьяк формирует уровень риска, хотя и допустимый, но заставляющий обратить на себя внимание. Геохимическая среда в угленосных пластах благоприятна для накопления микроэлементов по сравнению со средним фоном земной коры. Среднее мировое содержание As для битуминозных и бурых углей составляет, соответственно,  $9,0 \pm 0,8$  и  $7,4 \pm 1,4$  ppm, в пересчете на золу:  $50 \pm 5$  и  $49 \pm 8$  ppm, соответственно [52]. As является типоморфным для углей элементом. Содержание мышьяка в углях Кузбасса на том же уровне [53], однако в 35 % проб содержание мышьяка отличается крайне неоднородным распределением с коэффициентом вариации более 85 %. Поэтому при использовании пластов, обогащенных углем, коэффициенты опасности могут быть на порядок выше. Вовлекая в переработку уголь с тех или иных месторождений, нужно обращать внимание на содержание в нем мышьяка. При тех значениях безопасных уровней воздействия, которые рекомендует ЕРА и отечественное руководство, и при стандартных факторах экспозиции повышенные содержания мышьяка в почвах и пыли обуславливают канцерогенные и неканцерогенные риски, превышающие низкий уровень риска и переводящие проблему в ранг особо важных [33].

Воздействие других элементов, как показывает анализ табл. 3 и ранжированного ряда по уменьшению коэффициентов опасности, оценивается как безопасное. Вместе с тем все чаще внимание исследователей привлекают особенности длительного воздействия химических веществ в низких концентрациях, в плане возможно скрытых, отдаленных во времени изменений в организме.

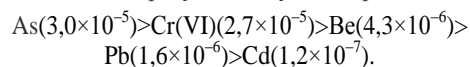
Sb, Cr, Cu могут накапливаться в пыли в процессе переноса воздушных потоков через массы вскрышных и вмещающих пород, поскольку концентрации этих элементов во вскрышных породах предприятий угольной промышленности превосходят средние концентрации в верхней части континентальной земной коры в 1,8–20,8 раз [54]. Цинк и свинец проявляются

при истирании бордюрного камня и при работе автотранспорта [22, 23]. Расчет в программном комплексе «Эра» на основании данных инвентаризации 96 источников выбросов в г. Междуреченске [55] показал: выбросы Mn на 56,8–68,9 % формируются угольными предприятиями, на 5,5 % – строительными предприятиями. 91,7 % Cr поступает в атмосферный воздух с угольных разрезов. Элементы оседают в пыли в составе частиц горных пород и угля как результат дальнего переноса от буровзрывных работ на близрасположенных угледобывающих месторождениях.

Значительная доля алюминия в составе взвешенных твердых частиц в атмосферном воздухе находится в виде природных соединений (например, полевых шпатов, глинистых минералов). Однако территории, подверженные воздействию выбросов от теплоэлектростанций, отличаются повышенными содержаниями в пробах твердого осадка снега техногенных микросферул алюмосиликатного состава [56].

Расчет индивидуального канцерогенного риска проводился с учетом стандартных факторов экспозиции (табл. 4) на основании данных о содержании тех элементов в составе уличной пыли, которые обладают канцерогенными свойствами. Согласно классификации Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) в оценку вошли Be, Cr (VI), As, Cd, Pb.

Оценка канцерогенного риска при пероральном поступлении элементов из уличной пыли показала следующее. По уменьшению уровня канцерогенного риска элементы образуют следующий ряд:



В этом ряду только влияние кадмия может расцениваться как пренебрежимое (менее  $10^{-6}$ ). Все остальные значения лежат в интервале более  $1 \times 10^{-6}$ , но менее  $1 \times 10^{-4}$ , и расцениваются как предельно допустимый риск. Данные уровни подлежат постоянному контролю. В некоторых случаях при таких уровнях риска могут проводиться дополнительные мероприятия по их снижению.

Индивидуальный канцерогенный риск, вызванный вдыханием Cr (VI), имеет значения в интервале от  $1,7 \times 10^{-5}$  до  $3,5 \times 10^{-5}$ . Но и эти значения можно считать завышенными, так как выбранный метод анализа определяет общее содержание элемента, без выделения содержания шестивалентного хрома, который обладает канцерогенностью.

Заслуживает обсуждения как набор элементов, потенциальных источников риска, так и мера риска – количественные характеристики их опасности для здоровья, в сравнении с данными по оценке риска для территорий различного использования и для угледобывающих регионов. Исследования [10, 21, 34, 57, 58] выполнены по аналогичной методике и близких значениях стандартных факторов экспозиции, что позволяет их сравнивать. Сравнение наших данных (нижняя строка табл. 5) с результатами по оценке риска в некоторых регионах Китая (Huangshi, Guizhou, Baotou), Индии (Jharia), России (Южный Урал) выявило следующие закономерности (табл. 5).

Модальные интервалы частных значений находятся в близком диапазоне, как видно из данных табл. 5. Ранжированные ряды по уменьшению суммарного коэффициента опасности существенно различаются набором элементов, вошедших в ранжированный ряд и вкладом каждого элемента в неканцерогенный риск.

Слабо прослеживается геохимическая проявленность уличной пыли в сравнении городских урбанизированных территорий и территорий углепромышленных районов. Это может указывать на сочетанное воздействие ряда факторов, сложность их дифференциации и привязки к конкретным источникам выбросов.

**Таблица 4.** Среднесуточные дозы и величины канцерогенных рисков от воздействия компонентов уличной пыли

**Table 4.** Average daily doses and values of carcinogenic risks from exposure to components of street dust

		Be	Cr (VI)	As	Cd	Pb
	SF <sub>0</sub> (мг/кг×день) <sup>-1</sup> (mg/kg×day) <sup>-1</sup>	4,3	0,42	1,5	0,38	0,047
LADD' пер (per), мг/кг×день mg/kg×day	среднее/mean	8,6×10 <sup>-7</sup>	6,1×10 <sup>-5</sup>	1,6×10 <sup>-3</sup>	2,7×10 <sup>-7</sup>	2,2×10 <sup>-5</sup>
	95 % UCL	1,0×10 <sup>-6</sup>	6,5×10 <sup>-5</sup>	2,0×10 <sup>-5</sup>	3,0×10 <sup>-7</sup>	3,4×10 <sup>-5</sup>
	min	3,0×10 <sup>-7</sup>	4,0×10 <sup>-5</sup>	2,9×10 <sup>-7</sup>	1,3×10 <sup>-7</sup>	6,5×10 <sup>-6</sup>
	max	2,1×10 <sup>-6</sup>	8,3×10 <sup>-5</sup>	3,6×10 <sup>-5</sup>	5,5×10 <sup>-7</sup>	2,0×10 <sup>-4</sup>
Rind канц пер (canc per)	среднее/mean	3,7×10 <sup>-6</sup>	2,6×10 <sup>-5</sup>	2,4×10 <sup>-5</sup>	1,0×10 <sup>-7</sup>	1,0×10 <sup>-6</sup>
	95 % UCL	4,3×10 <sup>-6</sup>	2,7×10 <sup>-5</sup>	3,0×10 <sup>-5</sup>	1,2×10 <sup>-7</sup>	1,6×10 <sup>-6</sup>
	min	1,3×10 <sup>-7</sup>	1,7×10 <sup>-5</sup>	4,4×10 <sup>-7</sup>	4,9×10 <sup>-8</sup>	3,1×10 <sup>-7</sup>
	max	9,1×10 <sup>-6</sup>	3,5×10 <sup>-5</sup>	5,4×10 <sup>-5</sup>	2,1×10 <sup>-7</sup>	9,4×10 <sup>-6</sup>
	SF <sub>1</sub> (мг/кг×день) <sup>-1</sup>	8,4	42	15	6,3	0,042
LADD' инг (inh), мг/кг×день mg/kg×day	среднее/mean	1,3×10 <sup>-10</sup>	9,0×10 <sup>-9</sup>	2,4×10 <sup>-9</sup>	3,9×10 <sup>-11</sup>	3,2×10 <sup>-9</sup>
	95 % UCL	1,5×10 <sup>-10</sup>	9,6×10 <sup>-9</sup>	3,0×10 <sup>-9</sup>	4,4×10 <sup>-11</sup>	5,1×10 <sup>-9</sup>
	min	4,4×10 <sup>-11</sup>	5,9×10 <sup>-9</sup>	4,3×10 <sup>-11</sup>	1,9×10 <sup>-11</sup>	9,5×10 <sup>-10</sup>
	max	3,1×10 <sup>-10</sup>	1,2×10 <sup>-8</sup>	5,3×10 <sup>-9</sup>	8,1×10 <sup>-11</sup>	2,9×10 <sup>-8</sup>
Rind канц пер (canc per)	среднее/mean	1,1×10 <sup>-9</sup>	3,8×10 <sup>-7</sup>	3,6×10 <sup>-8</sup>	2,5×10 <sup>-10</sup>	1,4×10 <sup>-10</sup>
	95 % UCL	1,2×10 <sup>-9</sup>	4,0×10 <sup>-7</sup>	4,4×10 <sup>-8</sup>	2,8×10 <sup>-10</sup>	2,1×10 <sup>-10</sup>
	min	3,7×10 <sup>-10</sup>	2,5×10 <sup>-7</sup>	6,5×10 <sup>-10</sup>	1,2×10 <sup>-10</sup>	4,0×10 <sup>-11</sup>
	max	2,6×10 <sup>-9</sup>	5,1×10 <sup>-7</sup>	8,0×10 <sup>-8</sup>	5,1×10 <sup>-10</sup>	1,2×10 <sup>-9</sup>

**Таблица 5.** Сравнительные данные по уровню неканцерогенного риска для некоторых регионов мира [10, 21, 34, 57, 58]

**Table 5.** Comparative data on the level of no-carcinogenic risk for some regions of the world [10, 21, 34, 57, 58]

Исследуемый регион, источник информации The region under study, the source of information	Ранжированный ряд по уменьшению суммарного коэффициента опасности Ranked series for reducing the total hazard coefficient	Характеристика образцов и методов анализа Characteristics of samples and methods of analysis
Индустриальный город, Huangshi, Центральный Китай [34] Industrial city, Huangshi, Central China [34]	Mn(0,8)>Cu(0,3)>Cd(0,2)>Pb(0,1)>Zn(0,05) Mn(0,8)>Cu(0,3)>Cd(0,2)>Pb(0,1)>Zn(0,05)	42 образца уличной пыли (смет), определено содержание 6 металлов во фракциях <25 μm и 25<D<75 μm, метод FAAS 42 samples of street dust (sweepings) were examined, the content of 6 metals in fractions <25 μm and 25<D<75 μm was determined, the FAAS method
Юго-Западная провинция Гуйчжоу, Китай, угольный район [57] Southwest Guizhou Province, China, coal mine area [57]	Hg>As>Cd>Pb>Cu>Ni>Cr Hg>As>Cd>Pb>Cu>Ni>Cr	30 проб, верхний слой почв в окрестностях угольных шахт 30 samples, topsoil in the vicinity of coal mines
г. Челябинск, Южный Урал, Россия (станция 1 около автодорожной магистрали) [10] Chelyabinsk, Southern Urals, Russia (station 1 near the highway) [10]	Mn(0,26)>Ni(4,26·10 <sup>-2</sup> )>Pb(2,37·10 <sup>-2</sup> )>Cd(1,75·10 <sup>-2</sup> )>Cr(1,53·10 <sup>-2</sup> )>Co(6,14·10 <sup>-3</sup> )>As(5,35·10 <sup>-3</sup> )>Zn(0,34·10 <sup>-3</sup> )>Cu(4,8·10 <sup>-5</sup> ) Mn(0,26)>Ni(4,26·10 <sup>-2</sup> )>Pb(2,37·10 <sup>-2</sup> )>Cd(1,75·10 <sup>-2</sup> )>Cr(1,53·10 <sup>-2</sup> )>Co(6,14·10 <sup>-3</sup> )>As(5,35·10 <sup>-3</sup> )>Zn(0,34·10 <sup>-3</sup> )>Cu(4,8·10 <sup>-5</sup> )	Пробы пыли с диаметром частиц PM <sub>2,5</sub> ; PM <sub>10</sub> (метод прокачки атмосферного воздуха), 120 проб с 3 станций, метод анализа – ICP MS Dust samples with a particle diameter of PM <sub>2,5</sub> ; PM <sub>10</sub> (atmospheric air pumping method), 120 samples from 3 stations, ICP MS analysis method
Баотоу, самый крупный город в автономном округе Внутренняя Монголия, Китай [21] Baotou, the biggest city in Inner Mongolia autonomous region, China [21]	Cr(8,76·10 <sup>-2</sup> )>Mn(1,6·10 <sup>-2</sup> )>Pb(1,5·10 <sup>-2</sup> )>Ba(1,35·10 <sup>-2</sup> )>V(1,34·10 <sup>-2</sup> )>Co(3,64·10 <sup>-3</sup> )>Cu(6,77·10 <sup>-4</sup> )>Zn(2,2·10 <sup>-4</sup> ) Cr(8,76·10 <sup>-2</sup> )>Mn(1,6·10 <sup>-2</sup> )>Pb(1,5·10 <sup>-2</sup> )>Ba(1,35·10 <sup>-2</sup> )>V(1,34·10 <sup>-2</sup> )>Co(3,64·10 <sup>-3</sup> )>Cu(6,77·10 <sup>-4</sup> )>Zn(2,2·10 <sup>-4</sup> )	Уличная пыль (смет), 116 образцов. Метод флуоресцентной спектрометрии, во фракции D<75 μm Street dust (sweepings), 116 samples. Method of fluorescence spectrometry, in fraction D<75 μm
Угольное месторождение Jharia, крупный регион по производству коксового угля, Индия [58] Jharia coalfield, a major coking coal production region, India [58]	Co(0,066)>Cr(0,04)>Pb(0,028)>As(0,017)>Ni(0,009)>Mn(0,005)>Cd,Cu(0,002)>Zn(0,34·10 <sup>-3</sup> ) Co(0,066)>Cr(0,04)>Pb(0,028)>As(0,017)>Ni(0,009)>Mn(0,005)>Cd,Cu(0,002)>Zn(0,34·10 <sup>-3</sup> )	45 проб, метод отбора пыли – объемное осаждение, метод анализа ICP-OES (ICAP 6300Duo, Thermo) 45 samples, dust sampling method volumetric deposition, analysis method ICP-OES (ICAP 6300Duo, Thermo)
г. Междуреченск, Южный Кузбасс, Россия Mezhdurechensk, Southern Kuzbass, Russia	As(15,7·10 <sup>-2</sup> )>Cr(4,1·10 <sup>-2</sup> )>Pb(2,35·10 <sup>-2</sup> )>Mn(2,19·10 <sup>-2</sup> )>Fe(1,82·10 <sup>-2</sup> )>Sb(1,52·10 <sup>-2</sup> )>Ba(1,4·10 <sup>-2</sup> )>V(1,32·10 <sup>-2</sup> ) As(15,7·10 <sup>-2</sup> )>Cr(4,1·10 <sup>-2</sup> )>Pb(2,35·10 <sup>-2</sup> )>Mn(2,19·10 <sup>-2</sup> )>Fe(1,82·10 <sup>-2</sup> )>Sb(1,52·10 <sup>-2</sup> )>Ba(1,4·10 <sup>-2</sup> )>V(1,32·10 <sup>-2</sup> )	29 проб уличной пыли (смет) отобраны по равномерной сети, определено содержание 73 элементов методом ICP MS в 4 фракциях: 1000–100, 100–50, 50–20, 20–4,5 мкм 29 samples of street dust (sweepings) were taken by equal net, content of 73 elements was determined by ICP MS method in 4 fractions: 1000–100, 100–50, 50–20, 20–4,5 μm

Как видно, не менее важны для прогнозирования рисков и содержания других элементов, выходящих на первые позиции при ранжировании, по данным других авторов из различных регионов мира, при изучении территорий различного функционального назначения [57–59].

#### Выводы

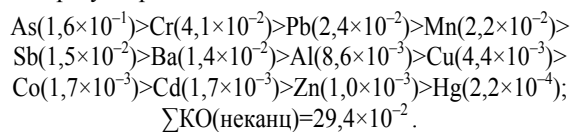
При добыче угля вблизи г. Междуреченска в атмосферный воздух выбрасывается значительное количество угольной пыли. По мере распространения аэротехногенных шлейфов от объектов по добыче и переработке угля частицы угольной пыли осаждаются из воздуха на деполирующие природные среды. В результате в уличной пыли накапливается широкий спектр химических элементов, содержащихся в вскрышных и вмещающих породах, угольной пыли и продуктах сгорания углей. Уровни накопления ряда элементов близки к пороговым значениям, которые в долгосрочной перспективе могут представлять опасность для здоровья человека.

Уличная пыль изученной территории обогащена Fe (7,5), As (4,8), Sb (4,0), Ag (2,7), Pb (2,1), Cu (1,3), Ti (1,29) относительно кларка верхней части континентальной земной коры. Превышение средних содержаний ряда элементов в уличной пыли над кларковыми значениями, а в отдельных точках очень существенное, может быть связано с воздействием автотранспорта (Pb), металлообрабатывающих предприятий (Fe, Ti, Cr), с продуктами сгорания угля (As, Hg), с дальним переносом от угледобывающих предприятий, с переносом воздушных потоков через массы вскрышных и вмещающих пород (Cr, Cu, Sb).

Экологические риски здоровья населения на основе данных о содержании элементов в уличной пыли (26 элементов по данным МС ИСП) оценены с учетом

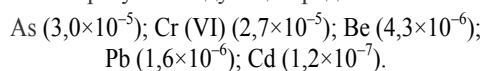
перорального, ингаляционного и кожного путей поступления и использованием стандартных факторов экспозиции.

По уменьшению суммарного КО (неканц.) элементы образуют ряд:



Коэффициенты ингаляционного воздействия менее 0,1 принято считать неопасными, согласно существующим критериям приемлемости риска. С этой точки зрения только мышьяк формирует уровень риска, хотя и допустимый, но заставляющий обратить на себя внимание.

По уменьшению уровня канцерогенного риска элементы образуют следующий ряд:



Значения, лежащие в интервале более  $1 \times 10^{-6}$ , но менее  $1 \times 10^{-4}$ , расцениваются как предельно допустимый риск. Данные уровни подлежат постоянному контролю. В некоторых случаях при таких уровнях риска могут проводиться дополнительные мероприятия по их снижению. Для уточнения этих данных необходимы подробные исследования, включающие изучение биодоступности металлов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00675 А.*

*Исследования выполнены в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suter G.W., Norton S.B. Ecological risk assessment // Encyclopedia of Ecology. 2<sup>nd</sup> ed. / Ed. by B. Fath. – Elsevier, 2019. – V. 1 – P. 402–406. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11137-6> (дата обращения 19.03.2023).
2. Fox D.R., Burgman M.A. Ecological risk assessment // Encyclopedia of quantitative risk assessment and analysis / Eds. E. Melnick, B. Everitt. – Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2008. – P. 1600–1603. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470061596.risk0268> (дата обращения 20.12.2021).
3. Современные вызовы и пути совершенствования оценки и управления рисками здоровью населения / В.Н. Ракитский, С.В. Кузьмин, С.Л. Авалиани, Т.А. Шашина, Н.С. Додина, В.А. Кислицин // Анализ риска здоровью. – 2020. – № 3. – С. 23–29. DOI: 10.21668/health.risk/2020.3.03. URL: <https://journal.ferisk.ru/2020/3/3> (дата обращения 20.12.2021).
4. Новиков С.М., Фокин М.В., Унгурияну Т.Н. Актуальные вопросы методологии и развития доказательной оценки риска здоровью населения при воздействии химических веществ // Гигиена и санитария. – 2016; – Т. 95 (8). – С. 711–716. DOI: 10.18821/0016–9900–2016–95–8–711–716
5. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин, С.Л. Авалиани, К.А. Буштуева. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
6. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Ю.А. Рахманин, С.М. Новиков, Т.А. Шашина, С. Ива-

нов. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.

7. Risk assessment guidance for superfund. V. 1. Human health evaluation manual. Interim final. – Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 1989. – 192 p. URL: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags\\_a.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags_a.pdf) (дата обращения 20.12.2022).
8. Technical air pollution resources // EPA: United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/technical-air-pollution-resources> (дата обращения 15.09.2017).
9. Kexin L., Liang T., Wang L. Risk assessment of atmospheric heavy metals exposure in Baotou, a typical industrial city in northern China // Environmental Geochemistry and Health. – 2015. – V. 38. – № 3. – P. 843–853.
10. Elemental composition of PM2.5 and PM10 and health risks assessment in the industrial districts of Chelyabinsk, South Ural region, Russia / T.G. Krupnova, O.V. Rakova, K.A. Bondarenko, A.F. Saifullin, D.A. Popova, S. Potgieter-Vermaak, R.H.M. Godoi // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – V. 18. – № 23. – P. 12354. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph182312354> (дата обращения 29.11.2022).
11. Май И.В., Зайцева Н.В. Показатели риска и вреда здоровью населения в системе новых механизмов мониторинга и управления качеством воздуха // Здоровье населения и среда обитания. – 2022. – Т. 30. – № 10. – С. 7–15.
12. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city, Russia / E. Konstantinova, T.M. Minkina, A.O. Konstantinov, S. Sushkova, E. Antonenko, A.

- Kurasova, S.V. Loiko // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2020. – V. 44. – P. 409–432.
13. Characteristics, sources and health risk assessment of trace metals in PM10 in Panzhuhua, China / X. Cheng, Y. Huang, Z. Long, S. Ni, Z. Shi, C. Zhang // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2017. – V. 98. – № 1. – P. 76–83.
14. Modeling cumulative effects in life cycle assessment: The case of fertilizer in wheat production contributing to the global warming potential / B. Laratte, B. Guillaume, J. Kim, B. Birregah // *Science of the Total Environment*. – 2014. – V. 481. – P. 558–595.
15. Integration of life cycle assessment and regional emission information in agricultural systems / J. Kim, A. Yalaltdinova, N. Sirina, N. Baranovskaya // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2015. DOI: 10.1002/jsfa.7149.
16. Belyanovskaya A., Laratte B., Perry N., Baranovskaya N. A regional approach for the calculation of characteristic toxicity factors using the USEtox model // *Science total environment*. – 2019. – V. 655. – P. 675–683.
17. HO. Ambient (Outdoor) Air Pollution. 2021. Available online: [https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата обращения 27.09.2021).
18. Assessment of pollution levels and human health risk of heavy metals in dust deposited on Yerevan's tree leaves (Armenia) / N. Maghakyan, G. Tepanosyan, O. Belyaeva, L. Sahakyan, A. Saghatelyan // *Acta Geochimica*. – 2016. – V. 36. – № 1. – P. 16–26.
19. Study on particulate matter air pollution, source origin, and human health risk based of PM10 metal content in Volos City, Greece / C. Emmanouil, E. Drositi, V. Vasilatou, E. Diapouli, K. Krikonis, K. Eleftheriadis, A. Kungolos // *Toxicological and Environmental Chemistry*. – 2016. – V. 99. – № 4. – P. 691–709.
20. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar basin in Xinjiang / C. Yang, T. Tashpolat, Y.-J. Hou, Y.-X. Gao, F. Liu, N. Xia // *Huanjing Kexue (Environmental Science)*. – 2016. – V. 37. – № 7. – P. 2453–2461.
21. Ecological and health risk assessment of metal in resuspended particles of urban street dust from an industrial city in China / X. Xu, X. Lu, X. Han, N. Zhao // *Current Science*. – 2015. – V. 108. – № 1. – P. 72–79.
22. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы / Н.С. Касимов, Д.В. Власов, Н.Е. Кошелева, Е.М. Никифорова. – М.: АПР, 2016. – 275 с.
23. Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Геохимия дорожной пыли (Восточный округ г. Москвы) // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. – 2015. – № 1. – С. 23–33.
24. Ladonin D.V., Mikhaylova A.P. Heavy metals and arsenic in soils and street dust of the southeastern administrative district of Moscow: long-term data // *Eurasian Soil Science*. – 2020. – V. 53. – № 11. – P. 1635–1644. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229320110095> (дата обращения 29.11.2022).
25. Ладонин Д.В., Низиенко Е.А. Тяжёлые металлы в почвах и дорожной пыли в зоне воздействия Стойло-Лебединского горнодобывающего комплекса // *Живые и биокосные системы*. – 2017. – № 22. – С. 3. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-22/article-3> (дата обращения 29.11.2022).
26. The content and sources of potentially toxic elements in the road dust of Surgut (Russia) / D. Moskovchenko, R. Pozhitkov, A. Soromotin, V. Tyurin // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13. – № 30. – P. 1–19. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13010030> (дата обращения 29.11.2022).
27. Кайгородов Р.В., Тиунова М.И., Дружинина А.В. Загрязняющие вещества в пыли проезжих частей дорог и в древесной растительности придорожных полос городской зоны // *Вестник Пермского университета*. – 2009. – № 10 (36). – С. 141–146.
28. Element analysis of solid particles in Mezhdurechensk city and adjacent territories according to the study of snow cover: Kemerovo region / N.A. Osipova, A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, K.Yu. Osipov // *26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. – 2020. – V. 11560. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2575576> (дата обращения 29.11.2022).
29. Влияние угледобывающих предприятий на загрязнение снегового покрова прилегающих урбанизированных территорий (на примере г. Междуреченск) / Н.А. Осипова, А.А. Быков, А.В. Таловская, А.Н. Николаенко, Е.Г. Язиков, С.А. Ларин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 36–46. URL: [http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45817/1/bulletin\\_tpu-2017-v328-i12-04.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45817/1/bulletin_tpu-2017-v328-i12-04.pdf) (дата обращения 29.11.2022).
30. Тяжелые металлы в почвах в районах воздействия угольных предприятий и их влияние на здоровье населения / Н.А. Осипова, Е.Г. Язиков, Н.П. Тарасова, К.Ю. Осипов // *Безопасность в техносфере*. – 2015. – Т. 4. – № 2. – С. 16–26.
31. Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant / J. George, R. Mastro, L. Ram, T.B. Das, T.K. Rout, M. Mohan // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2015. – V. 68. – № 3. – P. 451–461.
32. Contamination and health risks of heavy metals in street dust from a coal-mining city in eastern China / Z. Tang, M. Chai, J. Cheng, J. Jin, Y. Yang, Z. Nie, Q. Huang, Y. Li // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2016. – V. 138. – P. 83–91.
33. Potentially toxic elements and health risk assessment in farmland systems around high-concentrated arsenic coal mining in Xingren, China / Y.-J. Li, Z.-K. Wang, F.-X. Qin, Z.-Q. Fang, X.-L. Li, G. Li // *Journal of Chemistry*. – 2018. – V. 2018. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/2198176> (дата обращения 29.11.2022).
34. Contamination characteristics of heavy metals in particle size fractions from street dust from an industrial city, Central China / P. Zhong, J.Q. Zhang, D. Xu, Q. Tian, T.P. Hu, X.-Y. Gong, C.-L. Zhan, S. Liu, X.-L. Xing, S.-H. Qi // *Air Quality Atmosphere & Health*. – 2020. – V. 13. – № 7. – P. 871–883.
35. Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: public health implications in Guangdong Province, China / J. Liao, Z. Wen, X. Ru, J. Chen, H. Wu, C.-H. Wei // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2016. – V. 124. – P. 460–469.
36. Avila P.F., Ferreira da Silva E., Candeias C. Health risk assessment through consumption of vegetables rich in heavy metals: the case study of the surrounding villages from Panasqueira mine, Central Portugal // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2017. – V. 39. – № 3. – P. 565–589.
37. Contamination of heavy metals in agricultural soils: ecological and health risk assessment / R. Proshad, M. S. Islam, T. Kormoker, M.S. Bhuyan, MA Hanif, N. Hossain, R Roy, A.C. Sharma // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2019. – V. 2. – № 1. – P. 1–13.
38. Gorobei M. Carbon-containing dust: environmental impacts and human health effects of pollution and measures for prevention // *Environmental Pollution and Climate Change*. – 2020. – V. 4. – P. 38–39.
39. Munawer M.E. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes // *Journal of Sustainable Mining*. – 2017. – V. 17. – P. 87–96.
40. Elemental and magnetic analyses, source identification, and oxidative potential of airborne, passive, and street dust particles in Asaluyeh County, Iran / S. Abbasi, B. Keshavarzi, F. Moore, P.K. Hopke, F. Kelly, A. Oliete // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 707. – № 23. – P. 136132.
41. Язиков Е.Г. Экогеохимия территорий Западной Сибири: монография. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 360 с.
42. Seklecova O., Ponkratova T., Makhova L. Some problems of development in coal mining enterprises of the Kuznetsk basin and effective solutions to the problems // *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*. – 2019. – V. 19. – № 1.3. – P. 603–612. URL: <https://www.sgem.org/index.php/library/view=publication&task=show&id=5270> (дата обращения 29.11.2022).
43. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2021 году г. Кемерово, 2022. – 490 с. URL: [http://kuzbassco.ru/wp-content/uploads/2022/04/doclad\\_2021.pdf](http://kuzbassco.ru/wp-content/uploads/2022/04/doclad_2021.pdf) (дата обращения 29.11.2022).
44. Паспорт муниципальной программы «Укрепление общественного здоровья населения Междуреченского городского округа» на 2022–2024 гг. URL: <https://mrech.ru/government/dokumentatsiya/postanovleniya/2022/01/13/24437-2022-12.html> (дата обращения 29.11.2022).

45. Определение элементного состава природных и питьевых вод методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой: НСАМ № 480–Х (ред. 2016 г., взамен ред. 2006 г.; с изм. № 1 от 13.04.2011).
46. Разработка и апробация программного обеспечения для расчета показателей риска здоровью на основе унифицированной базы данных о содержании токсичных элементов в депонируемых средах / К.Ю. Осипов, Н.А. Осипова, А.В. Таловская, С.А. Новиков, Е.Г. Язиков // Проблемы экоинформатики: материалы XV Международного симпозиума. – М., 2022. – С. 115–119.
47. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2015. – № 2. – С. 7–17.
48. RAIS: The Risk Assessment Information System. URL: <http://rais.ornl.gov/> (дата обращения 20.09.2017).
49. Health effects assessment summary tables (HEAST). – Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 1997. – 241 p.
50. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
51. Таловская А.В., Володина Д.А., Язиков Е.Г. Макроэлементный и минерально-фазовый состав пыли в зоне воздействия цементного завода по данным изучения снегового покрова (Кемеровская обл.) // Химия в интересах устойчивого развития. – 2019. – № 2. – С. 201–210.
52. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Arsenic in coal: a review // International Journal of Coal Geology. – 2005. – V. 61. – № 3–4. – P. 141–196.
53. Ткачева Е.В., Арбузов С.И., Осипова Н.А. Экогеохимия ртути, сурьмы и мышьяка в углях Кузбасса // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: сборник докладов III международного симпозиума. – Иркутск, 2022. – С. 172–176.
54. Журавлева Н.В. Методы оценки влияния процессов добычи и переработки углей Кузнецкого угольного бассейна на экологическое состояние природной среды // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 4. – С. 102–112.
55. Оценка рисков воздействия выбросов в атмосферу на здоровье населения на основе модели рассеивания / Н.А. Осипова, А.А. Быков, А.В. Таловская, С.А. Ларин, Е.Г. Язиков // Углекислотная и экология Кузбасса: сборник тезисов докладов. – Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, 2020. – С. 44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44536887> (дата обращения 29.11.2022).
56. Минералогия пылевых аэрозолей в зоне воздействия промышленных предприятий г. Томска / Е.А. Филимоненко, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Ю.В. Чумак, С.С. Ильенко // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8-3. – С. 760–765.
57. Soil heavy metal(loid)s and risk assessment in vicinity of a coal mining area from southwest Guizhou, China / F.-X. Qin, C.-F. Wei, S. Zhong, X. Huang, W.-P. Pang, X. Jiang // Journal of Central South University. – 2016. – V. 23. – № 9. – P. 2205–2213.
58. Assessment of human health risks from heavy metals in outdoor dust samples in a coal mining area / T.K. Rout, R.E. Mastro, L.C. Ram, J. George, P.K. Padhy // Environmental Geochemistry and Health. – 2013. – V. 35. – № 3. – P. 347–356.
59. Pollution Characteristics and Risk Assessments of Mercury in Jiutai, a County Region Thriving on Coal Mining in Northeastern China / Y. Xiao, G. Zhang, J. Guo, Z. Zhang, H. Wang, Y. Wang, Z. Wang, H. Yuan, D. Cui // Sustainability. – 2022. – V. 14 (16). – 10366. <https://doi.org/10.3390/su141610366> (дата обращения 29.11.2022).

Поступила: 06.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 07.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Осипова Н.А.**, кандидат химических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Осипов К.Ю.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

**Таловская А.В.**, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Язиков Е.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Филимоненко Е.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, эксперт Института экологической и сельскохозяйственной биологии Тюменского Государственного университета.

**Новиков С.А.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 614.751-026.86(571.17)

## CONTENT OF TOXIC ELEMENTS IN STREET DUST AND RISK ASSESSMENT FOR HUMAN HEALTH (MEZHDURECHENSK, SOUTHERN KUZBASS)

**Nina A. Osipova<sup>1</sup>,**  
osipova@tpu.ru

**Konstantin Yu. Osipov<sup>2</sup>,**  
osipov@iao.ru

**Anna V. Talovskaya<sup>1</sup>,**  
talovskaj@yandex.ru

**Egor G. Yazikov<sup>1</sup>,**  
yazikoveg@tpu.ru

**Ekaterina A. Filimonenko<sup>3</sup>,**  
filimonenkoea@mail.ru

**Sergey A. Novikov<sup>1</sup>,**  
nsa@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,  
1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russia.

<sup>3</sup> Tyumen State University,  
25, Lenin avenue, Tyumen, 625003, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need for assessments of the impact of heavy metals and some other elements accumulating in urban street dust on public health.

**The purpose** of the research is to establish the elemental composition of street dust and to assess the health risk of exposure to toxic elements accumulating in the street dust of multi-industry regions, including active coal mining and coal refining (Mezhdurechensk, Southern Kuzbass); to determine the magnitude of carcinogenic and non-carcinogenic risk to public health.

**Objects:** street dust material obtained by sampling (29) according to the uniform network.

**Research methods:** method of sampling street dust by means of sweepings; separat of granulometric fractions of 1000-100, 100-50, 50-20 20-4,5 micron diameters by sieving; determination of granulometric composition and size of dust particles (SALD-7101 SHIMADZU with semiconductor laser); method of inductively coupled plasma mass spectrometry, NexION 300D to determine the content of 57 elements in samples; methods for assessing the risk of exposure to chemicals on human health.

**Research results.** Street dust is enriched with Fe (7,5), As (4,8), Sb (4,0), Ag (2,7), Pb (2,1), Cu (1,3), Ti (1,29), with respect to the clark of the upper part of the continental crust. Enrichment factors are given in parentheses, only those elements that are included in the risk assessment list are considered. The excess of the average contents of a number of elements in street dust over clark values, and at some points very significantly, may be due to the impact of motor transport (Pb), metalworking enterprises (Fe, Ti, Cr), coal combustion products (As, Hg), long-distance transfer from coal mining enterprises, transfer of air flows through the masses of overburden and host rocks (Cr, Cu, Sb). Ecological risks to public health from exposure to street dust components (26 elements were taken into account according to the ICI data) were assessed taking into account oral, inhalation and cutaneous routes of entry and using standard exposure factors. In order of decreasing values of the total hazard coefficients, taking into account all three routes of entry of pollutants, the elements form the following series: As ( $1,6 \times 10^{-1}$ ) > Cr ( $4,1 \times 10^{-2}$ ) > Pb ( $2,4 \times 10^{-2}$ ) > Mn ( $2,2 \times 10^{-2}$ ) > Sb ( $1,5 \times 10^{-2}$ ) > Ba ( $1,4 \times 10^{-2}$ ) > Al ( $8,6 \times 10^{-3}$ ) > Cu ( $4,4 \times 10^{-3}$ ) > Co ( $1,7 \times 10^{-3}$ ) > Cd ( $1,7 \times 10^{-3}$ ) > Zn ( $1,0 \times 10^{-3}$ ) > Hg ( $2,2 \times 10^{-4}$ );  $\sum KO = 29,4 \times 10^{-2}$ . The total hazard coefficient had a value of 0,29. This level of risk is characterized as acceptable (acceptable risk); it is at this level that the majority of foreign and recommended by international organizations hygiene standards for the population as a whole are established. However, the problem of long-term exposure to low doses of toxic elements on public health also needs to be studied. To reduce the level of carcinogenic risk, the elements form the following series: As ( $3,0 \times 10^{-5}$ ) > Cr (VI) ( $2,7 \times 10^{-5}$ ) > Be ( $4,3 \times 10^{-6}$ ) > Pb ( $1,6 \times 10^{-6}$ ) > Cd ( $1,2 \times 10^{-7}$ ). Values lying in the range of more than  $1 \times 10^{-6}$ , but less than  $1 \times 10^{-4}$ , are regarded as the maximum permissible risk. These levels are subject to constant monitoring. In some cases, at such risk levels, additional measures may be taken to reduce them. Comparison of risk indicators and geochemical characteristics of street dust indicates the need to take into account the ecological and geochemical features of depositing media when interpreting the results of risk assessment.

**Key words:**

Street dust, heavy metals, inhalation risk, carcinogenic risk, non-carcinogenic risk, coal energy.

*The reported study was funded by RFBR, project number 20-05-00675 A.*

*The research was carried out at NI TPU as part of the program to increase the competitiveness of TPU among the world's leading research centers.*

## REFERENCES

- Suter G.W., Norton S.B. Ecological risk assessment. *Encyclopedia of Ecology*. 2<sup>nd</sup> ed. Ed. by B. Fath. Elsevier, 2019. Vol. 1, pp. 402–406. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11137-6> (20 December 2022).
- Fox D.R., Burgman M.A. Ecological risk assessment. *Encyclopedia of Quantitative Risk Assessment and Analysis*. Eds. E. Melnick, B. Everitt. Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd, 2008. pp. 1600–1603. Available at: <https://doi.org/10.1002/9780470061596.risk0268> (accessed 20 December 2022).
- Rakitskiy V.N., Kuzmin S.V., Avaliani S.L., Shashina T.A., Dodina N.S., Kisilitsin V.A. Contemporary challenges and ways to improve health risk assessment and management. *Health Risk Analysis*, 2020, no. 3, pp. 23–29. In Rus. DOI: 10.21668/health.risk/2020.3.03; Available at: <https://journal.fcisk.ru/2020/3/3> (accessed 20 December 2022).
- Novikov S.M., Fokin M.V., Unguryanu T.N. Actual problem of methodology and development of evidence-based health risk assessment associated with chemical exposure. *Gigiena i sanitariya*, 2016, vol. 95 (8), pp. 711–716. In Rus. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-8-711-716
- Onishchenko G.G., Novikov S.M., Rahmanin Yu.A., Avaliani S.L., Bushtueva K.A. *Osnovy otsenki riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [Fundamentals of risk assessment for public health when exposed to chemicals that pollute the environment]. Moscow, Research Institute of EC and State Publ., 2002. 408 p.
- Rakhmanin Yu.A., Novikov S.M., Shashina T.A., Ivanov S. *Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [Guidelines for assessing the risk to public health from exposure to chemicals that pollute the environment]. Moscow, Federal Center of State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of the Russian Federation Publ., 2004. 143 p.
- Risk assessment guidance for superfund. Vol. 1. Human health evaluation manual. Interim final*. Washington, U.S. Environmental Protection Agency, 1989. 192 p. Available at: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags\\_a.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags_a.pdf) (accessed 20 December 2022).
- Technical air pollution resources*. EPA: United States Environmental Protection Agency. Available at: <https://www.epa.gov/technical-air-pollution-resources> (accessed 15 September 2017).
- Kexin L., Liang T., Wang L. Risk assessment of atmospheric heavy metals exposure in Baotou, a typical industrial city in northern China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, vol. 38, no. 3, pp. 843–853.
- Krupnova T.G., Rakova O.V., Bondarenko K.A., Saifullin A.F., Popova D.A., Potgieter-Vermaak S., Godoi R.H.M. Elemental composition of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> and health risks assessment in the industrial districts of Chelyabinsk, South Ural region, Russia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, vol. 18, no 23, pp. 12354. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph182312354> (accessed 30 November 2022).
- May I.V., Zaytseva N.V. Pokazateli riska i vreda zdorovyu naseleniya v sisteme novykh mekhanizmov monitoringa i upravleniya kachestvom vozduha [Indices of risk and harm to health of population in the system of new mechanisms of monitoring and managing air quality]. *Zdorove naseleniya i sreda obitaniya*, 2022, vol. 30, no. 10, pp. 7–15.
- Konstantinova E., Minkina T.M., Konstantinov A.O., Sushkova S., Antonenko E., Kurasova A., Loiko S.V. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city, Russia. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, vol. 44, pp. 409–432.
- Cheng X., Huang Y., Long Z., Ni S., Shi Z., Zhang C. Characteristics, sources and health risk assessment of trace metals in PM<sub>10</sub> in Panzhuhua, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, vol. 98, no. 1, pp. 76–83.
- Laratte B., Guillaume B., Kim J., Laratte B.B. Modeling cumulative effects in life cycle assessment: the case of fertilizer in wheat production contributing to the global warming potential. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 481, pp. 558–595.
- Kim J., Yalaltdinova A., Sirina N., Baranovskaya N. Integration of life cycle assessment and regional emission information in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2015. DOI: 10.1002/jsfa.7149.
- Belyanovskaya A., Laratte B., Perry N., Baranovskaya N. A regional approach for the calculation of characteristic toxicity factors using the USEtox model. *Science total environment*, 2019, vol. 655, pp. 676–683.
- HO. *Ambient (Outdoor) Air Pollution*. 2021. Available at: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed 27 September 2021).
- Maghakyan N., Tepanosyan G., Belyaeva O., Sahakyan L., Saghatelyan A. Assessment of pollution levels and human health risk of heavy metals in dust deposited on Yerevan’s tree leaves (Armenia). *Acta Geochimica*, 2016, vol. 36, no. 1, pp. 16–26.
- Emmanouil C., Drositi E., Vasilatou V., Diapouli E., Krikonis K., Eleftheriadis K., Kungolos A. Study on particulate matter air pollution, source origin, and human health risk based of PM<sub>10</sub> metal content in Volos City, Greece. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2016, vol. 99, no 4, pp. 691–709.
- Yang C., Tashpolat T., Hou Y.-J., Gao Y.-X., Liu F., Xia N. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar basin in Xinjiang. *Huanjing Kexue (Environmental Science)*, 2016, vol. 37, no. 7, pp. 2453–2461.
- Xu X., Lu X., Han X., Zhao N. Ecological and health risk assessment of metal in resuspended particles of urban street dust from an industrial city in China. *Current Science*, 2015, vol. 108, no. 1, pp. 72–79.
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geokhimiya landshaftov Vostochnoy Moskvy* [Geochemistry of landscapes of Eastern Moscow]. Moscow, APR Publ., 2016. 275 p.
- Vlasov D.V., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. *Geokhimiya dorozhnoy pyli (Vostochny okrug g. Moskvy)* [Geochemistry of road dust (Eastern District of Moscow)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2015, no. 1, pp. 23–33.
- Ladonin D.V., Mikhaylova A.P. Heavy metals and arsenic in soils and street dust of the southeastern administrative district of Moscow: long-term data. *Eurasian Soil Science*, 2020, vol. 53, no. 11, pp. 1635–1644. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1064229320110095> (accessed 30 November 2022).
- Ladonin D.V., Nizienko E.A. Tyazhelye metally v pochvakh i dorozhnoy pyli v zone vozdeystviya Stoylo-Lebedinskogo gorodobvyayushchego kompleksa [Heavy metals in soils and road dust in the impact zone of the Stoilo-Lebedinsky mining complex]. *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2017, no 22, pp. 3. Available at: <http://www.jbks.ru/archive/issue-22/article-3> (accessed 30 November 2022).
- Moskovchenko D., Pozhitkov R., Soromotin A., Tyurin V. The content and sources of potentially toxic elements in the road dust of Surgut (Russia). *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 30, pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13010030> (accessed 30 November 2022).
- Kaygorodov R.V., Tiunova M.I., Druzhinina A.V. Zagryaznyayushchie veshchestva v pyli proezhnikh chastey dorog i v drevesnoy rastitelnosti pridorozhnykh polos gorodskoy zony [Pollutants in the dust of roadways and in the woody vegetation of roadside lanes of the urban zone]. *Vestnik Permского universiteta*, 2009, no. 10 (36), pp. 141–146.
- Osipova N.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Osipov K.Yu. Element analysis of solid particles in Mezhdurechensk city and adjacent territories according to the study of snow cover: Kemerovo region. *26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, 2020, vol. 11560. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.2575576> (accessed 30 November 2022).
- Osipova N.A., Bykov A.A., Talovskaya A.V., Nikolaenko A.N., Yazikov E.G., Larin S.A. The influence of coal mining enterprises on the pollution of the snow cover of adjacent urbanized territories (using the example of Mezhdurechensk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 36–46. In Rus. Available at: [http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45817/1/bulletin\\_tpu-2017-v328-i12-04.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45817/1/bulletin_tpu-2017-v328-i12-04.pdf) (accessed 30 November 2022).

30. Osipova N.A., Yazikov E.G., Tarasova N.P., Osipov K.Yu. Tya-zhelye metally v pochvakh v rayonakh vozdeystviya ugolnykh predpriyatiy i ikh vliyaniye na zdorovye naseleniya [Heavy metals in soils in areas affected by coal enterprises and their impact on public health]. *Bezopasnost v tekhnosfere*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 16–26.
31. George J., Mastro R., Ram L., Das T.B., Rout T.K., Mohan M. Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, vol. 68, no. 3, pp. 451–461.
32. Tang Z., Chai M., Cheng J., Jin J., Yang Y., Nie Z., Huang Q., Li Y. Contamination and health risks of heavy metals in street dust from a coal-mining city in eastern China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, vol. 138, pp. 83–91.
33. Li Y.-J., Wang Z.-K., Qin F.-X., Fang Z.-Q., Li X.-L., Li G. Potentially toxic elements and health risk assessment in farmland systems around high-concentrated arsenic coal mining in Xingren, China. *Journal of Chemistry*, 2018, vol. 2018. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/2198176> (accessed 30 November 2022).
34. Zhong P., Zhang J.Q., Xu D., Tian Q., Hu T.P., Gong X.-Y., Zhan C.-L., Liu S., Xing X.-L., Qi S.-H. Contamination characteristics of heavy metals in particle size fractions from street dust from an industrial city, Central China. *Air Quality Atmosphere & Health*, 2020, vol. 13, no. 7, pp. 871–883.
35. Liao J., Wen Z., Ru X., Chen J., Wu H., Wei C.-H. Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: public health implications in Guangdong Province, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, vol. 124, pp. 460–469.
36. Avila P.F., Ferreira da Silva E., Candeias C. Health risk assessment through consumption of vegetables rich in heavy metals: the case study of the surrounding villages from Panasqueira mine, Central Portugal. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, vol. 39, no. 3, pp. 565–589.
37. Proshad R., Islam M.S., Kormoker T., Bhuyan M.S., Hanif M.A., Hossain N., Roy R., Sharma A.C. Contamination of heavy metals in agricultural soils: Ecological and health risk assessment. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 1–13.
38. Gorobei M. Carbon-containing dust: environmental impacts and human health effects of pollution and measures for prevention. *Environmental Pollution and Climate Change*, 2020, vol. 4, pp. 38–39.
39. Munawer M.E. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes. *Journal of Sustainable Mining*, 2017, vol. 17, pp. 87–96.
40. Abbasi S., Keshavarzi B., Moore F., Hopke P.K., Kelly F., Oliete A. Elemental and magnetic analyses, source identification, and oxidative potential of airborne, passive, and street dust particles in Asaluyeh County, Iran. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 707, no. 23, pp. 136132.
41. Yazikov E.G. *Ekogeokhimiya territoriy Zapadnoy Sibiri: monografiya* [Ecogeology of the territory of western Siberia. Monography]. Saarbrücken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publ. GmbH & Co. KG, 2011. 360 p.
42. Seklecova O., Ponkratova T., Makhova L. Some problems of development in coal mining enterprises of the Kuznetsk basin and effective solutions to the problems. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*, 2019, vol. 19, no. 1.3, pp. 603–612. Available at: <https://www.sgem.org/index.php/elibrary?view=publication&task=show&id=5270> (accessed 30 November 2022).
43. *Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Kemerovskoy oblasti – Kuzbassa v 2021 godu g. Kemerovo* [Report on the state and protection of the environment in Kemerovo region – Kuzbass in 2021, Kemerovo]. 2022. 490 p. Available at: [http://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2022/04/doclad\\_2021.pdf](http://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2022/04/doclad_2021.pdf) (accessed 29 November 2022).
44. *Pasport munitsipalnoy programmy «Ukrepenie obshchestvennogo zdorovya naseleniya Mezhdurechenskogo gorodskogo okruga» na 2022–2024 gg.* [Passport of the municipal program «Health promotion in Mezhdurechensk urban district» for 2022–2024]. Available at: <https://mrech.ru/government/dokumentatsiya/postanovleniya/2022/01/13/24437-2022-12.html> (accessed 29 November 2022).
45. *Opreделение элементного состава природных и питьевых вод методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой: NSAM № 480–H* [Determination of the elemental composition of natural and drinking waters by inductively coupled plasma mass spectrometry: NSAM No. 480–X] (ed. 2016, instead of ed. 2006; with ed. No. 1 of 13.04.2011).
46. Osipov K.Yu., Osipova N.A., Talovskaya A.V., Novikov S.A., Yazikov E.G. Razrabotka i aprobatsiya programmnoy obespecheniya dlya rascheta pokazateley riska zdorovyu na osnove unifikirovannoy bazy dannykh o sodержanii toksichnykh elementov v deponiruyushchikh sredakh [Development and testing of software for calculating health risk indicators based on a unified database on the content of toxic elements in depositing media]. *Problemy ekoinformatiki. materialy XV Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Problems of ecoinformatics. Proc. of the XV International Symposium]. Moscow, 2022. pp. 115–119.
47. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Klarki khimicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeokhimiye [Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeology]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2015, no. 2, pp. 7–17.
48. RAIS: *The Risk Assessment Information System*. Available at: <http://rais.ornl.gov/> (accessed 20 September 2017).
49. *Health effects assessment summary tables (HEAST)*. Washington, U.S. Environmental Protection Agency, 1997. 241 p.
50. Arbuzov S.I. Metallicity of Siberian coals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. In Rus.
51. Talovskaya A.V., Volodina D.A., Yazikov E.G. Macroelement and mineral-phase composition of dust in the impact zone of a cement plant according to the study of snow cover (Kemerovo region). *Chemistry for Sustainable Development*, 2019, no. 2, pp. 201–210. In Rus.
52. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Arsenic in coal: a review. *International Journal of Coal Geology*, 2005, vol. 61, no. 3–4, pp. 141–196.
53. Tkacheva E.V., Arbuzov S.I., Osipova N.A. Ekogeokhimiya rtuti, surmy i myshyaka v uglyakh Kuzbassa [Ecogeology of mercury, antimony and arsenic in Kuzbass coals]. *Rtut v biosfere: ekologo-geokhimicheskie aspekty. Sbornik dokladov III mezhdunarodnogo simpoziuma* [Mercury in biosphere; ecological and geochemical aspects. Collection of the reports of the III International meeting]. Irkutsk, 2022. pp. 172–176.
54. Zhuravleva N.V. Metody otsenki vliyaniya protsessov dobychi i pererabotki ugley Kuznetskogo ugolnogo basseyna na ekologicheskoe sostoyanie prirodnoy sredy [Methods for assessing the impact of coal mining and processing processes in the Kuznetsk coal basin on the ecological state of the natural environment]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*, 2016, no. 4, pp. 102–112.
55. Osipova N.A., Bykov A.A., Talovskaya A.V., Larin S.A., Yazikov E.G. *Otsenka riskov vozdeystviya vybrosov v atmosferu na zdorove naseleniya na osnove modeli rasseivaniya. Uglekhiymiya i ekologiya Kuzbassa. Sbornik tezisov dokladov* [Assessment of the risks of the impact of atmospheric emissions on public health based on the dispersion model. Coal chemistry and ecology of Kuzbass. Collection of abstracts]. Kemerovo, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2020. pp. 44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44536887> (accessed 29 November 2022).
56. Filimonenko E.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Chumak Yu.V., Il'enok S.S. Mineralogiya pylevykh aerorozley v zone vozdeystviya promyshlennykh predpriyatiy g. Tomsk [Mineralogy of dust aerosols in the zone of impact of industrial enterprises of Tomsk]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 8-3, pp. 760–765.
57. Qin F.-X., Wei C.-F., Zhong S., Huang X., Pang W.-P., Jiang X. Soil heavy metal(loid)s and risk assessment in vicinity of a coal mining area from southwest Guizhou, China. *Journal of Central South University*, 2016, vol. 23, no. 9, pp. 2205–2213.
58. Rout T.K., Mastro R.E., Ram L.C., George J., Padhy P.K. Assessment of human health risks from heavy metals in outdoor dust samples in a coal mining area. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, vol. 35, no. 3, pp. 347–356.
59. Xiao Y., Zhang G., Guo J., Zhang Z., Wang H., Wang Y., Wang Z., Yuan H., Cui D. Pollution characteristics and risk assessments of mercury in Jiutai, a county region thriving on coal mining in northeastern China. *Sustainability*, 2022, vol. 14 (16), 10366. Available at: <https://doi.org/10.3390/su141610366> (accessed 29 November 2022).

Received: 6 December 2022.

Reviewed: 7 January 2023.

**Information about the authors**

*Nina A. Osipova*, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Konstantin Yu. Osipov*, Cand. Sc., senior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

*Anna V. Talovskaya*, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Egor G. Yazikov*, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Ekaterina A. Filimonenko*, Cand. Sc., expert, Tyumen State University.

*Sergey A. Novikov*, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 29.03.2023. Дата выхода журнала: 31.03.2023.  
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 28,50. Уч.-изд. л. 25,78.  
Заказ 75-23. Тираж 500 экз. Цена свободная.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.