



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

12+

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

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 332, № 10, 2021

Издательство  
Томского политехнического университета  
2021

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

## Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. г.-м. наук, проф. (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)  
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. 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)  
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. 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, 2021

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.)

ISSN (print) – 2500-1019  
ISSN (on\_line) – 2413-1830

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339  
(без самоцитирования – 0,287)

«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 геологических объектов.

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

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

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

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)

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

Volume 332, № 10, 2021

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

**Editorial Board**

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)  
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)  
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)  
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)  
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Rui D., PhD (Portugal)  
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., PhD (Spain)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)  
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)  
Buznik V.M., Dr. Sc. (Russia)  
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)  
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. 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)  
Belozherov V.B., 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)  
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Анализ потерь электроэнергии в системе электроснабжения обогатительной фабрики**  
Клюев Р.В., Голик В.И., Босиков И.И., Гаврина О.А.
- Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпitherмального рудного поля Светлое (Хабаровский край)**  
Левочская Д.В., Якич Т.Ю., Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С.
- Мониторинг аэротехногенного воздействия Сыктывкарского лесопромышленного комплекса**  
Василевич М.И., Кондратенко Б.М., Очеретенко Д.П., Василевич Р.С., Габов Д.Н., Лодыгин Е.Д.
- Assessment of hazardous engineering-geological and hydrogeological processes on the Almaty city territory**  
Zhakup A.E., Mirilas V.M., Auelkhan Ye.S.
- Акустические исследования глубоководных газовых факелов Охотского моря**  
Черных Д.В., Саломатин А.С., Юсупов В.И., Шахова Н.Е., Космач Д.А., Дударев О.В., Гершелис Е.В., Силионов В.И., Ананьев Р.А., Семилетов И.П.
- Исследование влияния температуры и скорости течения на вязкость нефтяных эмульсий**  
Мингулов И.Ш., Валеев М.Д., Мухаметшин В.В., Мингулов Ш.Г., Кулешова Л.С.
- Исследование эффективности выноса воды и механических примесей с забоя нефтяных скважин**  
Уразаков К.Р., Алиматов Ш.А., Тугунов П.М.
- Исследование механизма разрушения призабойной зоны пласта фильтрационным потоком пластовой жидкости и предотвращение пробкообразования в скважине**  
Хабибуллин М.Я.
- Утилизация разнородных нефтяных газов в универсальной малоэмиссионной газотурбинной установке с внешним подогревом топливного газа**  
Шилова А.А., Бачев Н.Л.
- Новые данные комплексного исследования геомеханических и петрофизических свойств пород-коллекторов Долгинского месторождения Печорского моря**  
Дзюбло А.Д., Бороздин С.О.
- Влияние верхне-ширванского канала на изменение гидрогеолого-мелиоративных условий Ширванской степи Азербайджана**  
Гюльмамедов Ч.Д. оглы
- Разработка и исследование нового способа газоочистки от частиц размером менее 2,5 мкм**  
Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Боченков А.С., Нестеров В.А.
- Применение машинного обучения для прогнозирования пластового давления при разработке нефтяных месторождений**  
Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н., Захаров Л.А., Шадров Т.А.
- Изменение миграции химических элементов в районе размещения предприятия нефтепереработки**  
Боев В.В., Барановская Н.В., Боев В.А.
- Получение матричного материала на основе алюминатного перовскита, предназначенного для иммобилизации актиноидов, методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза**  
Долматов О.Ю., Кузнецов М.С., Семенов А.О.
- 7 Analysis of electric power loss in the power supply system of the concentrating factory**  
Klyuev R.V., Golik V.I., Bosikov I.I., Gavrina O.A.
- 17 Hydrothermal-altered zoning, fluid conditions, and types of gold mineralization within the Elena and Emy deposits of the epithermal Svetloe ore district (Khabarovsk territory)**  
Levochskaya D.V., Yakich T.Yu., Lesnyak D.V., Ananiev Yu.S.
- 33 Monitoring of aerotechnogenic impact of Syktyvkar timber industry complex**  
Vasilevich M.I., Kondratenok B.M., Ocheretenko D.P., Vasilevich R.S., Gabov D.N., Lodygin E.D.
- 45 Оценка опасных инженерно-геологических и гидрогеологических процессов на территории города Алматы**  
Жакып А.Е., Мирлас В.М., Аюелхан Е.С.
- 57 Acoustic investigations of the deepest methane seeps in the Okhotsk sea**  
Chernykh D.V., Salomatin A.S., Yusupov V.I., Shakhova N.E., Kosmach D.A., Dudarev O.V., Gershelis E.V., Silionov V.I., Ananiev R.A., Semiletov I.P.
- 69 Study of temperature and flow rate influence on the viscosity of oil emulsions**  
Mingulov I.Sh., Valeev M.D., Mukhametshin V.V., Mingulov Sh.G., Kuleshova L.S.
- 77 Investigation of the efficiency of removing water and mechanical impurities from the bottom of oil wells**  
Urazakov K.R., Alimetov Sh.A., Tugunov P.M.
- 86 Research of a reservoir bottom zone destruction by filtering flow of the formation liquid and prevention of call formation in the well**  
Khabibullin M.Ya.
- 95 Utilization of heterogeneous petroleum gases in a universal low-emission gas turbine unit with external fuel gas heating**  
Shilova A.A., Bachev N.L.
- 105 New data of a comprehensive geomechanical and petrophysical study of the Dolginskoe field reservoir properties**  
Dzublo A.D., Borozdin S.O.
- 116 Influence of the Verkhe-Shirvan canal on changes of hydrogeological and meliorative conditions of the Shirvan steppe of Azerbaijan**  
Gulmammadov Ch.C. ogly
- 127 Development and research of a new method of gas cleaning from particles less than 2,5 micron in size**  
Khmelev V.N., Shalunov A.V., Bochenkov A.S., Nesterov V.A.
- 140 Application of machine learning for forecasting formation pressure in oil field development**  
Martyushev D.A., Ponomareva I.N., Zakharov L.A., Shadrov T.A.
- 150 Change of migration of chemical elements in the area of location of the petroleum refining plant**  
Boev V.V., Baranovskaya N.V., Boev V.A.
- 160 Development of matrix material based on aluminate perovskite for immobilization of actinides by self-propagating high-temperature synthesis**  
Dolmatov O.Yu., Kuznetsov M.S., Semenov A.O.

- Особенности распределения редкоземельных элементов в водах и донных отложениях малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины**  
Страховенко В.Д., Овдина Е.А.
- Обзор состояния производства и потребления баритового сырья в России**  
Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю.
- Особенности выработки трудноизвлекаемых запасов нефти неоднородных коллекторов Тюменской свиты (на примере месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»)**  
Грачев С.И., Юдчиц В.В., Дручин В.С., Юнусов Р.Р.
- Углеродистый остаток от термической переработки нефтешлама как основа для био-топливной композиции**  
Табакеев Р.Б., Ларионов К.Б., Ибраева К.Т., Шаненков И.И., Заворин А.С.
- Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей**  
Глазырин А.С., Полищук В.И., Тимошкин В.В., Баннов Д.М., Исаев Ю.Н., Антаськин Д.И., Кладиев С.Н., Филипас А.А., Ланграф С.В., Котин Д.А., Ковалев В.З.
- 171 Features of distribution of rare earth elements in the waters and bottom sediments of small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain**  
Strakhovenko V.D., Ovdina E.A.
- 180 Current state of production and consumption of barite raw materials in Russia**  
Boyarko G.Yu., Khatkov V.Yu.
- 192 Specific aspects of oil reserves development from discontinuous low-productive reservoirs of Tyumen geological interval (on the example of JSC LUKOIL-West Siberian fields)**  
Grachev S.I., Yudchits V.V., Druchin V.S., Yunusov R.R.
- 202 Carbon residual from the thermal processing of oil sludge as the basis for a bio-fuel composition**  
Tabakaev R.B., Larionov K.B., Ibraeva K.T., Shanenkov I.I., Zavorin A.S.
- 213 Modelling of induction motor in multiphase coordinate system for asymmetry rotor cage**  
Glazyrin A.S., Polishchuk V.I., Timoshkin V.V., Bannov D.M., Isaev Yu.N., Antyaskin D.I., Kladiyev S.N., Filipas A.A., Langraf S.V., Kotin D.A., Kovalev V.Z.

УДК 621.311

## АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ

Клюев Роман Владимирович<sup>1</sup>,  
kluev-roman@ramler.ru

Голик Владимир Иванович<sup>2</sup>,  
v.i.golik@mail.ru

Босиков Игорь Иванович<sup>2</sup>,  
igor.boss.777@mal.ru

Гаврина Оксана Александровна<sup>2</sup>,  
Gavrina-Oksana@yandex.ru

<sup>1</sup> Московский политехнический университет,  
Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38.

<sup>2</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),  
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью комплексного исследования системы электроснабжения обогатительных фабрик. Для этого следует разработать эффективную методику расчета потерь электроэнергии по отдельным технологическим механизмам и фабрике в целом, что даст возможность существенно сократить энергетическую составляющую затрат в ходе выпуска продукции.

**Цель:** разработать методику определения потерь электроэнергии по отдельным технологическим механизмам в различных режимах работы, которая может быть использована на аналогичных предприятиях.

**Объекты:** горно-обогатительные фабрики, которые характеризуются сложностью определения энергетических характеристик технологического оборудования.

**Методы:** совокупность детерминированных и вероятностно-статистических методов определения потерь электроэнергии. Детерминированные методы включают расчет максимальных потерь, средних нагрузок, графического интегрирования, среднеквадратичного тока. В свою очередь, вероятностно-статистические основаны на исследовании статистических характеристик и применении статистических выборок схем сети.

**Результаты.** На основании экспериментальных исследований разработана методика определения потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения обогатительной фабрики в номинальном и в эксплуатационном режиме. Установлено, что отношение коэффициентов потерь в номинальном и эксплуатационном режимах работы, определяющее степень использования пропускной способности кабельной сети 6 кВ, находится в пределах 1,02–2,57. В среднем кабельная сеть 6 кВ недогружена на 25–30 %. Фактические потери электроэнергии в кабельной сети 6 кВ оказались меньше номинальных и составляют менее 1 % от общей потребляемой электроэнергии, следовательно, проведение каких-либо мероприятий для уменьшения потерь электроэнергии нецелесообразно. Средневзвешенный коэффициент мощности по обогатительной фабрике равен 0,82, поэтому может оказаться целесообразным проведение мероприятий по компенсации реактивной мощности. Расчет параметров компенсирующих устройств и выбор места их установки предусмотрены планом работ на будущий период.

### Ключевые слова:

Обогатительная фабрика, потери электроэнергии, кабельная сеть, система электроснабжения, метод графического интегрирования, мощность оборудования.

### Введение

При разработке месторождений полезных ископаемых показатели эффективности производства во многом зависят от потребления электроэнергии, особенно на стадии обогащения руд с использованием мощного энергонасыщенного оборудования. Резервом снижения потребления электроэнергии является минимизация ее потерь в энергозатратных процессах, например, механохимическом извлечении металлов из руд [1], а также повышении эффективности ее использования [2–9].

Рассматриваемая в работе обогатительная фабрика включает следующие технологические переделы:

- 1) измельчение баритовых и меднопиритовых руд;
- 2) дробление руды;

- 3) транспортировка руды, реагентное отделение;
- 4) флотация;
- 5) фильтрация и сушка;
- 6) известковое отделение;
- 7) компрессорная;
- 8) хвостовое хозяйство.

В ходе выпуска продукции основным технологическим оборудованием являются шаровые мельницы, дробилки и насосы.

Потери электроэнергии должны систематически контролироваться и поддерживаться в экономически целесообразных границах. Контроль за величиной потерь электроэнергии ведется на каждом участке сети поэлементно. Выявленные участки сети с повышенными потерями против рациональных значений потерь электроэнергии должны быть реконструированы.

Наиболее часто применяется метод графического интегрирования, при котором, имея характер изменения протекающего по линии тока во времени в виде графика в координатных осях  $I, t$ , можно определить потери электроэнергии графическим путем; метод среднеквадратичного тока, в котором действительный переменный по величине ток заменяется неизменным по величине током  $I_{\text{ср.кв.}}$ , при котором за время  $T$  в линии выделяются такие же потери энергии. Известна также модификация этих методов [10, 11].

#### Выбор методики определения потерь электроэнергии

Для расчета потерь в радиальных сетях 6 кВ обогатительной фабрики ГОК используем совокупность некоторых методов, которые используются различными учеными [12–20]. Величина времени потерь электроэнергии определится по годовому графику нагрузки по продолжительности. Этот график получается из действительного годового графика нагрузки, имеющего самую причудливую форму, перестроением последнего в порядке убывания его координат.

Потери электроэнергии определяются по формуле:

$$\Delta W = 3R \int_0^T I_t^2 dt = 3R \sum_{i=1}^n I_i^2 \Delta t = 3R \frac{t}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $n$  – число равных интервалов времени  $\Delta t$ ;  $R$  – эквивалентное активное сопротивление линии;  $t$  – текущее время;  $I_t=f(t)$  – график нагрузки.

При использовании неизменной максимальной нагрузки такое же количество нагрузочных потерь выделится за меньшее время. Это время называется временем максимальных потерь ( $\tau_{\text{max}}$ ).

С учетом использования ( $\tau_{\text{max}}$ ) формулу (1) можно записать следующим образом:

$$\Delta W = 3R \int_0^T I_t^2 dt = 3RI_{\text{max}}^2 \tau = \Delta P_{\text{max}} \tau, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{max}}$  – величина максимальных потерь активной мощности.

Откуда:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\int_0^T I_t^2 dt}{I_{\text{max}}^2}. \quad (3)$$

Вторая зависимость определяет связь между временем потерь и параметрами годового графика активной мощности:

$$\tau_{\text{max}} = 2T_{\text{max}} - 8760 + \frac{8760 - T_{\text{max}}}{1 + \frac{T_{\text{max}}}{8760} - \frac{2P_{\text{min}}}{P_{\text{max}}}} \left( 1 - \frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{max}}} \right).$$

Однако для определения  $\tau_{\text{max}}$  по этой формуле требуется дополнительная информация, определение которой связано с некоторыми трудностями.

Для оценки потерь энергии в радиальных сетях, питающих чисто промышленную нагрузку, достаточную точность дают кривые, построенные А.А. Глазуновым. Здесь  $\tau_{\text{max}}$  определяются в зависимости от

времени использования максимальной нагрузки  $T_{\text{max}}$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$ .

Значения годового числа использования максимальной нагрузки  $T_{\text{max}}$  целесообразно принимать не среднестатистическими, а на основании действительных данных. Зная расход электроэнергии оборудования за текущий период (например, за год), номинальную мощность и учитывая, что в рабочем режиме электрооборудование загружено не на номинальную мощность, можно принять, что:

$$P_{\text{max}} = P_{\text{ном}}.$$

Тогда

$$T_{\text{max}} = \frac{W_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}}. \quad (4)$$

Действительную загрузку за отчетный период можно определить, зная расход электроэнергии за период и среднее время работы оборудования за этот же период  $T_{\text{раб.ср.}}$  определяется из анализа суточных графиков нагрузки, поэтому в качестве отчетного периода принимаются одни сутки. Формула принимает вид:

$$P_{\text{раб}} = \frac{W_{\text{раб}}}{365T_{\text{раб.ср}}}.$$

При снижении мощности асинхронного двигателя уменьшается его коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ):

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{Q}{P} \right)^2}}, \quad (5)$$

где  $P$  и  $Q$  – соответственно, активная и реактивная мощности, потребляемые двигателем.

При номинальной загрузке потребляемая реактивная мощность:

$$Q_{\text{н}} = P_{\text{н}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}. \quad (6)$$

Для двигателей с  $\cos \varphi=0,77 \dots 0,79$  реактивная мощность холостого хода составляет около 70 % реактивной мощности:

$$Q_{\text{xx}} \approx 0,7Q_{\text{н}}. \quad (7)$$

Увеличение потребления реактивной мощности при полной загрузке двигателя по сравнению с потреблением при холостом ходе:

$$\Delta Q_{\text{н}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{xx}}. \quad (8)$$

При нагрузке менее номинальной прирост потребления реактивной мощности по сравнению с холостым ходом пропорционален квадрату коэффициента загрузки двигателя:

$$\Delta Q = k_3^2 \Delta Q_{\text{н}}, \quad (9)$$

где  $k_3^2 = \frac{P}{P_{\text{н}}}$  – коэффициент загрузки двигателя.

Таким образом, реактивная мощность, потребляемая двигателем при произвольной загрузке, составляет:

$$Q = Q_{\text{xx}} + k_3^2 \Delta Q_{\text{н}}. \quad (10)$$



С учетом (6)–(10) выражение (5) запишется следующим образом:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{Q_{xx} + k_3^2 \Delta Q_H}{P} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \frac{P_H \operatorname{tg} \varphi_H \cdot \left[ 0,7 + 0,3 \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \right]}{P} \right]^2}} \quad (11)$$

Для двигателей с номинальным коэффициентом мощности:  $\cos \varphi_H = 0,8 \dots 0,9$ ;  $Q_{xx} \approx 0,6 Q_H$ . А для:  $\cos \varphi_H = 0,91 \dots 0,93$ ;  $Q_{xx} \approx 0,5 Q_H$ .

Поэтому формула (5) для них запишется соответственно:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \frac{P_H \operatorname{tg} \varphi_H \cdot \left[ 0,6 + 0,4 \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \right]}{P} \right]^2}}$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \frac{P_H \operatorname{tg} \varphi_H \cdot \left[ 0,5 + 0,5 \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \right]}{P} \right]^2}}$$

Величина потерь активной энергии может быть подсчитана по известным значениям среднеквадратичного тока:

$$\Delta W = 3R \int_0^t I_t^2 dt = 3RI_{\text{ср. кв}}^2 T,$$

где  $I_{\text{ср. кв}}$  – значение среднеквадратичного тока.

Откуда:

$$I_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\frac{\int_0^T I_t^2 dt}{T}} \quad (12)$$

Среднеквадратичный ток – это такой условный ток, неизменный по величине, при протекании которого по линии в течение времени  $T$  создаются такие потери, какие линия имеет при работе по действительному графику нагрузки за то же время.

Выразив  $\int_0^T I_t^2 dt$  из выражения (3) и подставив его в (12), можно получить следующее выражение для среднеквадратичного тока:

$$I_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\frac{I_{\text{max}}^2 \tau}{T}} = I_{\text{max}} \sqrt{\frac{\tau}{T}} \quad (13)$$

С учетом выражения (13) величина потерь активной энергии будет равна:

$$\Delta W = 3I_{\text{ср. кв}}^2 RT = 3I_{\text{max}}^2 R \tau = \Delta P \tau, \quad (14)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в кабельной сети.

Преобразуя выражение (14) к виду, удобному для расчетов, получим:

$$\Delta W = 3R \sum_{i=1}^n I_{\text{ср. кв}, i}^2 T_i = \frac{R}{(U_H \cos \varphi)^2} \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{T_i}, \quad (15)$$

где  $R$  – активное сопротивление кабеля, Ом;  $U_H$  – номинальное напряжение сети, кВ;  $\cos \varphi$  – действительный коэффициент мощности;  $W_i$  – расход электроэнергии за расчетный период, кВт·ч;  $T_i$  – расчетный период, ч.

При расчете потерь электрической энергии в трансформаторах, важнейшими факторами являются: фактическая загрузка трансформаторов, число параллельно работающих трансформаторов, не отключаемых при снижении нагрузки, и годовые потери холостого хода.

Для трехфазных трехобмоточных трансформаторов потери электроэнергии рассчитываются по предложенным А.А. Федоровым формулам, где предполагается, что  $k_3$  при включении  $n$  трансформаторов увеличивается соответственно в  $n$  раз, т. е.  $k_3 = \text{const}$ :

$$\Delta W = n \Delta P_{xx} T + \frac{1}{n} \left[ k_{3\text{BH}}^2 \Delta P_{\text{кзBH}} + k_{3\text{CH}}^2 \Delta P_{\text{кзCH}} + k_{3\text{HH}}^2 \Delta P_{\text{кзHH}} \right] \tau.$$

При  $k_3 = \text{var}$  формула имеет вид:

$$\Delta W = n \Delta P_{xx} T + \left[ \left( \frac{k_{3\text{BH}}^2}{n} \right) \Delta P_{\text{кзBH}} + \left( \frac{k_{3\text{CH}}^2}{n} \right) \Delta P_{\text{кзCH}} + \left( \frac{k_{3\text{HH}}^2}{n} \right) \Delta P_{\text{кзHH}} \right] \tau, \quad (16)$$

где  $k_3$  – коэффициент загрузки соответствующей обмотки;  $n$  – число параллельно работающих трансформаторов;  $\Delta P_{xx}$  – потери мощности для режимов холостого хода;  $\Delta P_{\text{кз}}$  – потери мощности для режима короткого замыкания соответствующей обмотки.

Потери мощности в металле обмоток определяются следующими выражениями:

$$\Delta P_{\text{кзBH}} = \frac{\Delta P_{\text{кзBH-CH}} + \Delta P_{\text{кзBH-HH}} - \Delta P_{\text{кзCH-HH}}}{2} \quad (17)$$

$$\Delta P_{\text{кзCH}} = \frac{\Delta P_{\text{кзBH-CH}} + \Delta P_{\text{кзCH-HH}} - \Delta P_{\text{кзBH-HH}}}{2} \quad (18)$$

$$\Delta P_{\text{кзHH}} = \frac{\Delta P_{\text{кзBH-HH}} + \Delta P_{\text{кзCH-HH}} - \Delta P_{\text{кзBH-CH}}}{2} \quad (19)$$

Величина потерь для номинального и расчетного режима работы элементов электрической сети оценивается по значению коэффициентов потерь активной энергии.

Значение коэффициента потерь в номинальном режиме работы элемента или участка электрической сети определяется по формуле:

$$K_{nW_n} = \frac{\Delta W_n}{W_n} = \frac{\Delta P_n}{\sum_{i=1}^n P_{ni}} \cdot \tau, T_{\max}$$

где  $\Delta P_n$  – суммарные потери активной мощности в номинальном режиме работы, кВт;  $\sum_{i=1}^n P_{ni}$  – суммарная номинальная активная мощность группы элементов или участка сети, кВт;  $\tau$  – продолжительность потерь активной мощности в течение года, ч;  $T_{\max}$  – продолжительность использования максимума активной нагрузки, ч.

Значение коэффициента потерь в рабочем режиме элемента и участка электросети определяется по формуле:

$$K_{nW_p} = \frac{\Delta W_p}{W_p} = \frac{\Delta P_p}{\sum_{i=1}^n P_{pi}} \cdot \tau, T_{\max}$$

где  $\Delta P_p$  – суммарные потери активной мощности в рабочем режиме работы, кВт;  $\sum_{i=1}^n P_{pi}$  – суммарная рабочая активная мощность группы элементов или участка сети, кВт:

$$\sum_{i=1}^n P_{pi} = 3 \sum_{i=1}^n I_{pi}^2 R_i.$$

По соотношению коэффициентов расчетных и номинальных потерь судят об использовании возможностей элементов системы электроснабжения:

$$K_n^* = \frac{K_{nW_p}}{K_{nW_n}} = \frac{\Delta P_p \sum_{i=1}^n P_{ni}}{\Delta P_n \sum_{i=1}^n P_{pi}}.$$

С помощью коэффициента расчетных потерь группы элементов или участка электрической сети определяются величины потерь активной энергии за рассматриваемый интервал времени по величине потребляемой активной мощности или энергии:

$$\Delta W = \frac{\Delta P_p \tau}{\sum_{i=1}^n P_{pi} T_{\max}} W_{\text{потр}} = K_{nW_p} W_{\text{потр}}.$$

#### Расчет потерь электроэнергии

Потери электрической энергии в кабельных сетях складываются из потерь в каждом отдельном кабеле, расчет которых проводится по вышеприведенной методике.

В качестве примера рассмотрим расчет потерь электроэнергии в кабеле типа ААБГВ (3×70) длиной  $l=400$  м, питающем дробилку № 1 от ГРУ – 6 кВ.

1. Активное сопротивление кабеля:

$$R = r_0 \cdot l, \quad (20)$$

где  $r_0$  – погонное сопротивление, Ом/км;  $l$  – длина кабеля, км.

Погонное сопротивление всех кабелей с алюминиевыми жилами сечением 70 мм<sup>2</sup>:  $r_0=0,447$  Ом/км при  $x_0=0,08$  Ом/км.

$$R=0,447 \cdot 0,4=0,179 \text{ Ом.}$$

- На основании данных по расходу электроэнергии за 2019 г. определим расход электроэнергии в рабочем режиме за 2019 г.:  $W_{\text{раб}}=154440$  кВт·ч.
- По суточным графикам нагрузок определим среднее время работы оборудования за сутки:  $T_{\text{раб.ср}}=3$  ч.
- Определим годовое число часов использования максимальной активной нагрузки:

$$T_{\max} = \frac{W_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}},$$

где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность двигателя дробилки, кВт.

$$T_{\max} = \frac{154440}{250} = 620 \text{ ч.}$$

- По годовому числу часов использования максимальной нагрузки  $T_{\max}=620$  ч и коэффициенту мощности двигателя  $\cos \varphi_n=0,78$  определяем значение времени максимальных потерь:  $\tau=f(T_{\max}, \cos \varphi_n)$ , равное  $\tau=500$  ч.
- По формуле (2) определим потери мощности в кабеле в номинальном режиме работы дробилки:

$$\Delta P_{\text{ном}} = 3R \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot 10^{-3} = 0,585 \text{ кВт.}$$

Соответственно потери электроэнергии в кабеле в номинальном режиме работы дробилки:

$$\Delta W_{\text{ном}} = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \tau = 0,585 \cdot 500 = 292,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

- Рассчитаем среднюю рабочую мощность электродвигателя за сутки:

$$P_{\text{раб}} = \frac{W}{T} = \frac{154440}{365 \cdot 3} = 141 \text{ кВт.}$$

- Потери электроэнергии в рабочем режиме определим из соотношения (15). Потери электроэнергии определим по данным 2019 г. Расчетный период составляет  $T=365 \cdot T_{\text{раб.ср}}$ .

Действительный коэффициент мощности двигателя определим по выражению (11), так как  $\cos \varphi_n=0,78$ :

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \frac{250 \cdot 0,8023 \cdot \left[ 0,7 + 0,3 \cdot \left( \frac{141}{250} \right)^2 \right]^2}{141} \right]^2}} = 0,66.$$

$$\Delta W_{\text{раб}} = \frac{0,179}{(6 \cdot 0,66)^2} \cdot \frac{154440^2}{365 \cdot 3} \cdot 10^{-3} = 248,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

- Потери мощности в данном кабеле в рабочем режиме будут равны:

$$\Delta P_{\text{раб}} = \frac{\Delta W_{\text{раб}}}{\tau} = \frac{248,6}{500} = 0,497 \text{ кВт.}$$

10. Рассчитаем действительный коэффициент использования оборудования:

$$k_{и} = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{141}{250} = 0,56.$$

11. Определим рабочий ток двигателя:

$$I_{\text{раб}} = \frac{P_{\text{раб}}}{\sqrt{3}U_{н} \cos \varphi_{н} \eta},$$

где  $\eta$  – КПД двигателя.

$$I_{\text{раб}} = \frac{141}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,66 \cdot 0,95} = 22 \text{ А.}$$

12. Определим коэффициент потерь мощности в номинальном режиме:

$$K_{п.н} = \frac{\Delta P_{н}}{P_{н}} = \frac{0,585}{250} = 0,234 \cdot 10^{-2}.$$

13. Коэффициент потерь мощности в рабочем режиме:

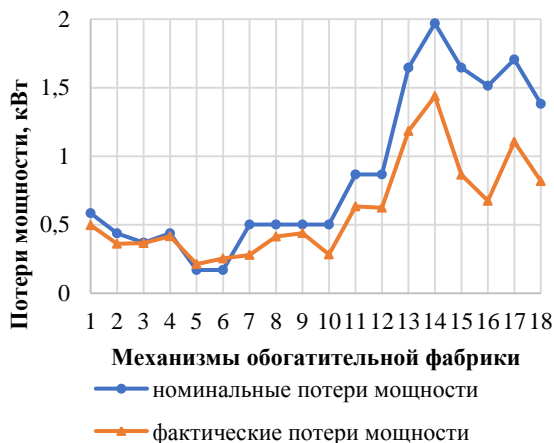
$$K_{п.р} = \frac{\Delta P_{\text{раб}}}{P_{\text{раб}}} = \frac{0,497}{141} = 0,352 \cdot 10^{-2}.$$

14. Относительный коэффициент потерь активной мощности:

$$K^* = \frac{K_{п.р}}{K_{п.н}} = \frac{0,352 \cdot 10^{-2}}{0,234 \cdot 10^{-2}} = 1,5.$$

Аналогичным образом определяются потери мощности и электроэнергии в кабельных сетях 6 кВ по всем высоковольтным приемникам обогатительной фабрики.

Значения потерь мощности для отдельных механизмов обогатительной фабрики приведены на рисунке.



**Рисунок.** Значения потерь мощности для отдельных механизмов обогатительной фабрики: 1–4 – дробилки № 1–4; 5, 6 – шаровые мельницы № 2, 3; 7–12 – насосы № 1–6; 13–18 – шаровые мельницы № 4–10

**Figure.** Power loss values for individual mechanisms of the processing plant: 1–4 – crushers no. 1–4; 5, 6 – ball mills no. 2, 3; 7–12 – pumps no. 1–6; 13–18 – ball mills no. 4–10

Как видно из рисунка, фактические потери мощности почти у всех потребителей оказываются меньше номинальных. Исключение составляют только двигатели привода шаровых мельниц № 2, 3. Так как планом развития предусмотрен переход с переработки баритосодержащих руд на золотосодержащие руды, то мельницы № 2, 3 демонтируются. Поэтому проведение каких-либо мероприятий для уменьшения потерь электроэнергии в этих мельницах нецелесообразно.

Определим потери мощности и энергии в кабелях 6 кВ от трансформаторов ГПП до ГРУ напряжением 6 кВ.

На ГПП рабочим является один трансформатор; второй служит резервом. Кроме того, в работе может находиться либо один ввод ГРУ, и тогда оставшаяся часть потребителей ГРУ запитывается через межсекционный выключатель; либо включены оба ввода, и секции ГРУ работают раздельно. При работающем одном вводе ГРУ энергия может передаваться по двум или трем ниткам кабелей (в зависимости от работающего трансформатора).

Потери определим для трех случаев: а) работает один ввод и две нитки кабеля; б) работает один ввод и три нитки кабеля; в) работают два ввода и обе нитки кабелей.

Активное сопротивление кабелей определяется по выражению (20). Погонное сопротивление кабелей с алюминиевыми жилами сечением 185 мм<sup>2</sup> при  $r_0=0,167$  Ом/км;  $x_0=0,073$  Ом/км.

$$\text{а) } R_1 = 0,167 \cdot 0,8 \cdot \frac{1}{2} = 0,067 \text{ Ом;}$$

$$\text{б) } R_2 = 0,167 \cdot 0,8 \cdot \frac{1}{3} = 0,045 \text{ Ом;}$$

$$\text{в) } R_3 = 0,167 \cdot 0,8 \cdot \frac{1}{5} = 0,027 \text{ Ом.}$$

Определим суммарный расход электроэнергии всех потребителей 6 кВ за 2019 г.:

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n W_i = 39388080 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Средневзвешенный коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_{\text{ср. вэ}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{pi} \cdot \cos \varphi_i}{\sum_{i=1}^n P_{pi}} = \frac{6758,3}{8237} = 0,82.$$

Определим средневзвешенный коэффициент использования всего оборудования, подключенного к ГРУ напряжением 6 кВ:

$$k_{и \text{ ср. вэ}} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{и} P_{pi}}{\sum_{i=1}^n P_{pi}} = \frac{5562,34}{8237} = 0,68.$$

Суммарный ток, протекающий от ГПП к ГРУ в рабочем режиме с учетом коэффициента использования определится:

$$I_{\Sigma \text{раб}} = k_{\text{и ср.вз}} \sum_{i=1}^n I_{\text{ip}} = 0,68 \cdot 1054,2 = 716,9 \text{ А.}$$

Потери мощности определим по выражению (2):

$$\text{а) } \Delta P_1 = 3 \cdot 716,9^2 \cdot 0,067 = 103,3 \text{ кВт};$$

$$\text{б) } \Delta P_2 = 3 \cdot 716,9^2 \cdot 0,045 = 69,4 \text{ кВт};$$

$$\text{в) } \Delta P_3 = 3 \cdot 716,9^2 \cdot 0,027 = 41,6 \text{ кВт.}$$

Годовое число часов использования максимальной активной нагрузки всех приемников определим по выражению (4):  $T_{\text{max}} = \frac{W_{\Sigma}}{P_{\text{max}}}$ . Максимальную мощность принимаем равной  $P_{\text{max}}=6,3$  МВт на основе анализа данных тридцатиминутной максимальной нагрузки за 2019 г. Тогда:

$$T_{\text{max}} = \frac{39388080}{6300} = 6200 \text{ ч.}$$

По годовому числу часов использования активной нагрузки и средневзвешенному коэффициенту мощности оборудования определим значение времени максимальных потерь  $\tau=f(T_{\text{max}}; \cos\varphi_{\text{ср.вз.}})$ , равное  $\tau=5000$  ч. Определим потери электроэнергии в кабелях ввода по (14):

$$\text{а) } \Delta W_{\text{раб.1}} = 103,3 \cdot 5000 = 516500 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\text{б) } \Delta W_{\text{раб.2}} = 69,4 \cdot 5000 = 347000 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\text{в) } \Delta W_{\text{раб.3}} = 41,6 \cdot 5000 = 208000 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Для снижения потерь электроэнергии в кабельных линиях от трансформаторов ГПП до ГРУ напряжением 6 кВ целесообразно, чтобы в работе находились оба ввода и кабельные линии работали параллельно.

При работе одного ввода и трех ниток кабелей потеря энергии составит

$$\begin{aligned} \Delta W_1 &= \Delta W_{\text{раб.2}} - \Delta W_{\text{раб.3}} = \\ &= 347000 - 208000 = 139000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \end{aligned}$$

или 67 % от оптимального режима.

При работе одного ввода и двух ниток кабелей потеря энергии составит

$$\begin{aligned} \Delta W_2 &= \Delta W_{\text{раб.1}} - \Delta W_{\text{раб.3}} = \\ &= 516500 - 208000 = 308500 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \end{aligned}$$

или 148 % от оптимального режима.

Соответственно стоимость избыточных потерь электроэнергии будет равна:

$$C_1 = 139000 \cdot 5,05 = 701950 \text{ р./г};$$

$$C_2 = 308500 \cdot 5,05 = 1557925 \text{ р./г},$$

где 5,05 – стоимость 1 кВт·ч для обогатительной фабрики в 2019 г.

Определим потери электроэнергии в трансформаторах ГПП. В нормальном режиме работы комбината один трансформатор является рабочим, другой – резервным. Обмотка низшего напряжения трансформатора 6 кВ питает обогатительную фабрику, а обмотка среднего напряжения 10 кВ – карьер и все вспомогательные подразделения фабрики.

Анализируя данным по расходу электроэнергии и показания счетчиков максимумов на ГПП за период с 2011 по 2019 г., можно сделать вывод, что наблюдается постоянная тенденция роста электропотребления. Но с 2016 г. процесс стабилизировался, и максимальная мощность за 2019 г. составляет 10,5 МВт, а средняя мощность за этот же год:

$$P_{\text{ср30}} = \frac{10,5 + 8,375 + 7,863 + 9,382}{4} = 9 \text{ МВт.}$$

На ГПП установлены два трехобмоточных трансформатора ТДТН-25000-110/10/6 с номинальной мощностью  $S_{\text{ном}}=25000$  МВА.

С допущением на дальнейший рост мощности комбината можно утверждать, что трансформатор загружен на половину своей мощности и коэффициент загрузки обмотки высокого напряжения равен  $k_{\text{зВН}}=0,5$ .

Также на основании данных по учету электроэнергии на ГПП определяем, что потребление электроэнергии на стороне 10 кВ составляет примерно 40 % от общего электропотребления и поэтому коэффициенты загрузок обмоток среднего и низкого напряжения составят соответственно  $k_{\text{зСН}}=0,2$ ;  $k_{\text{зНН}}=0,3$ . Из паспортных данных трансформатора определяем потери холостого хода и короткого замыкания:  $\Delta P_{\text{xx}}=36$  кВт;  $\Delta P_{\text{кз.ВН-НН}}=145$  кВт;  $\Delta P_{\text{кз.ВН-СН}}=72,5$  кВт;  $\Delta P_{\text{кз.СН-НН}}=72,5$  кВт. На основании годовых данных расхода электроэнергии определяем максимальное число часов работы  $T_{\text{max}}$ :

$$T_{\text{max}} = \frac{W_{\text{год}}}{P_{\text{30max}}}$$

- за 2016 г.:  $T_{\text{max}} = \frac{59358600}{10500} = 5700$  ч;

- за 2017 г.:  $T_{\text{max}} = \frac{66255000}{10500} = 6300$  ч;

- за 2018 г.:  $T_{\text{max}} = \frac{68317800}{10500} = 6500$  ч;

- за 2019 г.:  $T_{\text{max}} = \frac{71200800}{10500} = 6800$  ч.

Принимаем  $T_{\text{max}}=7000$  ч. Тогда  $\tau=5700$  ч.

Определим потери мощности в металле обмоток по (17)–(19):

$$\Delta P_{\text{кз.ВН}} = \frac{72,5 + 145 - 72,5}{2} = 72,5 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{кз.СН}} = \frac{72,5 + 72,5 - 145}{2} = 0 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{кз.НН}} = \frac{145 + 72,5 - 72,5}{2} = 72,5 \text{ кВт.}$$

Потери энергии в трансформаторах определим по формуле (16) для двух случаев: а) работает один трансформатор; б) оба трансформатора работают параллельно.

$$\begin{aligned} \text{а) } \Delta W_1 &= 2 \cdot 36 \cdot 7000 + \\ &+ [0,5^2 \cdot 72,5 + 0,3^2 \cdot 72,5] \cdot 5700 = \\ &= 392505 \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{б) } \Delta W_2 &= 2 \cdot 36 \cdot 7000 + \\ &+ \left[ \left( \frac{0,5}{2} \right)^2 \cdot 72,5 + \left( \frac{0,3}{2} \right)^2 \cdot 72,5 \right] \cdot 5700 = \\ &= 539126 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Стоимость потерь электроэнергии составит соответственно:

$$C_1 = 392505 \cdot 5,05 = 1982150,2 \text{ р./г.}$$

$$C_2 = 539126 \cdot 5,05 = 2722586,3 \text{ р./г.}$$

Тогда при работе одного трансформатора и двух ниток кабеля стоимость потерь будет равна:

$$C_1 = (516500 + 392505) \cdot 5,05 = 4590475,2 \text{ р./г.}$$

При работе одного трансформатора и трех ниток кабеля стоимость потерь будет равна:

$$C_2 = (347000 + 392505) \cdot 5,05 = 3734500,2 \text{ р./г.}$$

При работе двух трансформаторов:

$$C_3 = (208000 + 539126) \cdot 5,05 = 3772986,3 \text{ р./г.}$$

Как видно, наиболее экономичным является режим работы одного трансформатора и трех ниток кабеля.

Выясним целесообразность замены на ГПП существующих трансформаторов ТДТН-25000 на трансформаторы ТДТН-16000.

В этом случае коэффициенты загрузки обмоток трансформатора будут равны:  $k_{3ВН}=0,7$ ;  $k_{3СН}=0,3$ ;  $k_{3НН}=0,4$ . Из паспортных данных трансформатора определяем потери холостого хода и короткого замыкания:  $\Delta P_{\text{хх}}=26$  кВт;  $\Delta P_{\text{кз.ВН-НН}}=105$  кВт;  $\Delta P_{\text{кз.ВН-СН}}=52,5$  кВт;  $\Delta P_{\text{кз.СН-НН}}=52,5$  кВт. Потери мощности в металле обмоток по выражениям (17)–(19):  $\Delta P_{\text{кз.ВН}}=52,5$  кВт;  $\Delta P_{\text{кз.СН}}=0$  кВт;  $\Delta P_{\text{кз.НН}}=52,5$  кВт.

Потеря энергии в трансформаторе определится по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta W &= 26 \cdot 7000 + [0,7^2 \cdot 52,5 + 0,4^2 \cdot 52,5] \cdot 5700 = \\ &= 376512 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Стоимость потерь электроэнергии составит:

$$C = 376512 \cdot 5,05 = 1901385,6 \text{ р./г.}$$

Если принять, что при замене ежегодные издержки на обслуживание трансформаторов останутся такими же, то суммарные затраты на демонтаж трансформаторов ТДТН-25000 и установку трансформаторов ТДТН-16000 с учетом срока окупаемости последних будут равны:

$$Z = 0,12 \Delta K,$$

$$\Delta K = K - (K_1 - K_1 N_a n),$$

где  $K$  – стоимость новых трансформаторов;  $K_1$  – стоимость старых трансформаторов;  $N_a$  – норма амортизации;  $n$  – число лет работы трансформаторов.

$$Z = 0,12 \times$$

$$\begin{aligned} \times [3900000 - (4800000 - 4800000 \cdot 0,064 \cdot 6)] = \\ = 113184 \text{ р./г.} \end{aligned}$$

Таким образом, затраты на монтажные работы превышают величину экономии электроэнергии, получаемую в результате замены трансформаторов:

$$\mathcal{E}_{\Delta W} = C_2 - C = 3734500,2 - 1901385,6 = 1833114,6 \text{ р.}$$

В данном случае замена существующих трансформаторов на трансформаторы меньшей мощности нецелесообразна.

#### Выводы

1. Разработана методика определения потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения в номинальном и в эксплуатационном режиме.
2. Отношение коэффициентов потерь в номинальном и эксплуатационном режимах работы, определяющее степень использования пропускной способности кабельной сети напряжением 6 киловольт, находится в пределах 1,02–2,57. В среднем кабельная сеть недогружена на 25–30 %.
3. Фактические потери электроэнергии в кабельной сети напряжением 6 кВ оказались меньше номинальных и составляют менее 1 % от общей потребляемой электроэнергии, следовательно, проведение каких-либо мероприятий для уменьшения потерь электроэнергии нецелесообразно.
4. Средневзвешенный коэффициент мощности по обогатительной фабрике равен 0,82, поэтому может оказаться целесообразным проведение мероприятий по компенсации реактивной мощности. Расчет компенсирующих устройств и выбор места их установки предусмотрены планом работ на будущий период.
5. Для снижения потерь электроэнергии в кабельных линиях от трансформаторов ГПП до ГРУ целесообразно, чтобы в работе находились оба ввода и кабельные линии работали параллельно. При работе одного ввода стоимость дополнительных потерь электроэнергии составляет 1557925 р./г.
6. Коэффициенты загрузки трансформаторов ГПП равны:  $k_{3ВН}=0,5$ ;  $k_{3СН}=0,2$ ;  $k_{3НН}=0,3$ . Однако замена их на трансформаторы меньшей мощности нецелесообразна в связи с высокой стоимостью монтажных работ. При плановой замене трансформаторов ГПП и существующем уровне энергопотребления рекомендуется замена трансформаторов ТДТН-25000 на ТДТН-16000. При этом будет получен экономический эффект:
 
$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \mathcal{E}_{\Delta W} + \mathcal{E}_{\Delta K} = \\ &= 1833114,6 + 0,12 \cdot (4800000 - 3900000) = \\ &= 1941114,6 \text{ р./г.} \end{aligned}$$
7. Проведен анализ потерь электроэнергии в электрической сети обогатительной фабрики в условиях горных территорий, характеризующихся сложными климатическими условиями и необходимостью обеспечения эффективного энергообеспечения труднодоступных отдаленных потребителей электроэнергии. Новизна разработанной методики заключается в получении новых данных по потерям мощности для отдельных потребителей фабрики (дробилки, шаровые мельницы, насосы и т. д.), а также в установлении необходимости проведения комплексных мероприятий по компенсации реактивной мощности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И. Условия выщелачивания цветных металлов из забалансового сырья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 6–16.
2. Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning // Computers & Industrial Engineering. – 2016. – V. 101. – P. 243–259.
3. Bornschlegl M., Bregulla M., Franke J. Methods-Energy Measurement – an approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies // Journal of Cleaner Production. – 2016. – V. 1351. – P. 644–656.
4. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, A. Buldysko, M. Shabalov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.
5. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, А. В. Майер, О.А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283–290.
6. Improving the energy efficiency of technological equipment at mining enterprises / R. Klyuev, I. Bosikov, O. Gavrina, M. Madaeva, A. Sokolov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – V. 1258. – P. 262–271.
7. Energy indicators of drilling machines and excavators in mountain territories / R. Klyuev, O. Fomenko, O. Gavrina, R. Turluev, S. Marzoev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – V. 1258. – P. 272–281.
8. Стефанов В.К., Антоненков Д.В., Игумнова С.А. Удельный расход электроэнергии карьерных экскаваторов работающих в условиях крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S4. – С. 32–38.
9. Ляхомский А.В., Петухов С.В. Энергоэффективность экскаваторных работ угледобывающих предприятий // Промышленная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 38–41.
10. Wang J., Du Yu, Wang J. LSTM based long-term energy consumption prediction with periodicity // Energy. – 2020. – V. 197. – Article 117197.
11. Wang R., Lu Sh., Feng W. A novel improved model for building energy consumption prediction based on model integration // Applied Energy. – 2020. – V. 262. – Article 114561.
12. Farhadi P., Golmohammadi, A., Malvajerdi A., Shahgholi G. Tire and soil effects on power loss: measurement and comparison with finite element model results // Journal of Terramechanics. – 2020. – V. 92. – P. 13–22.
13. Distribution networks nontechnical power loss estimation: A hybrid data-driven physics model-based framework / A. Bretas, A. Rossoni, R. Trevizan, N. Bretas // Electric Power Systems Research. – 2020. – V. 186. – Article 106397.
14. Nappu M., Arief A. Network losses-based economic redispatch for optimal energy pricing in a congested power system // Energy Procedia. – 2016. – V. 100. – P. 311–314.
15. Sizing energy storage systems in DC networks: a general methodology based upon power losses minimization / M. Fantauzzi, D. Lauria, F. Mottola, A. Scalfati // Applied Energy. – 2017. – V. 187. – P. 862–872.
16. Hartmann B., Farkas C. Energy efficient data centre infrastructure – development of a power loss model // Energy and Buildings. – 2016. – V. 127. – P. 692–699.
17. Routray A., Mistry K., Arya S. Wake analysis on wind Farm power generation for loss minimization in radial distribution system // Renewable Energy Focus. – 2020. – V. 34. – P. 99–108.
18. Davidov S., Pantoš M. Optimization model for charging infrastructure planning with electric power system reliability check // Energy. – 2019. – V. 166. – P. 886–894.
19. Afzali P., Keynia F., Rashidinejad M. A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders // Energy. – 2019. – V. 171. – P. 701–709.
20. Rebello S., Yu H., Ma L. An integrated approach for system functional reliability assessment using dynamic bayesian network and hidden Markov model // Reliability Engineering & System Safety. – 2018. – V. 180. – P. 124–135.

Поступила 16.06.2021 г.

## Информация об авторах

**Клюев Р.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры техники низких температур им. П.Л. Капицы Московского политехнического университета.

**Голик В.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии разработки месторождений Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

**Босиков И.И.**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геологии Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

**Гаврина О.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

UDC 621.311

## ANALYSIS OF ELECTRIC POWER LOSS IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE CONCENTRATING FACTORY

**Roman V. Klyuev<sup>1</sup>,**  
kluev-roman@ramler.ru

**Vladimir I. Golik<sup>2</sup>,**  
v.i.golik@mail.ru

**Igor I. Bosikov<sup>2</sup>,**  
igor.boss.777@mal.ru

**Oksana A. Gavrina<sup>2</sup>,**  
Gavrina-Oksana@yandex.ru

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University,  
33, B. Semenovskaya street, Moscow, 107023, Russia.

<sup>2</sup> North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University),  
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need for a comprehensive study of the power supply system of the processing plants. For this, it is necessary to develop an effective methodology for calculating electricity losses for individual technological mechanisms and the factory as a whole, which will make it possible to significantly reduce the energy component of costs during the production process.

**The main aim** of the research is to develop a methodology for determining energy losses by individual technological mechanisms in various operating modes, which can be used at similar enterprises.

**Objects:** mining and concentrating factories, which are characterized by the complexity of determining the energy characteristics of technological equipment.

**Methods:** a combination of deterministic and probabilistic-statistical methods for determining energy losses. Deterministic methods include calculating maximum losses, average loads, graphical integration, and rms current. The probabilistic statistical ones, in their turn, are based on the study of statistical characteristics and the use of statistical samples of network schemes

**Results.** Based on the experimental studies, a methodology has been developed for determining the energy losses in the elements of the power supply system of the concentrating factory in nominal and operational mode. It was established that the ratio of loss factors in the nominal and operational modes of operation, which determines the degree of utilization of the capacity of the cable network of 6 kV, is in the range of 1,02–2,57. On average, a 6 kV cable network is underloaded by 25–30 %. Actual electricity losses in the 6 kV cable network turned out to be less than the nominal ones and make up less than 1 % of the total electricity consumed, therefore, any measures to reduce electricity losses are impractical. The weighted average power factor for the concentration plant is 0,82, so it may be appropriate to carry out measures to compensate the reactive power. The calculation of the parameters of the compensating devices and the choice of their installation site are provided for by the work plan for the future period.

### Key words:

Processing plant, electricity losses, cable network, power supply system, graphic integration method, equipment capacity.

### REFERENCES

- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Lyashenko V.I. Conditions for leaching non-ferrous metals from off-balance materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 6–16. In Rus.
- Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, vol. 101, pp. 243–259.
- Bornschlegl M., Bregulla M., Franke J. Methods-Energy Measurement – an approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 1351, pp. 644–656.
- Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.
- Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020, no.2, pp. 283–290. In Rus.
- Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O., Madaeva M., Sokolov A. Improving the energy efficiency of technological equipment at mining enterprises. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258, pp. 262–271.
- Klyuev R., Fomenko O., Gavrina O., Turluev R., Marzoev S. Energy indicators of drilling machines and excavators in mountain territories. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258, pp. 272–281.
- Stefanov V.K., Antonenkov D.V., Igumnova S.A. Specific power consumption of quarry excavators operating in the far North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2019, no (S4), pp. 32–38. In Rus.
- Lyakhomsky A.V., Petuhov S.V. Energy efficiency of excavating operations of coal mining enterprises. *Promyshlennaya energetika*, 2019, no. 1, pp. 38–41. In Rus.
- Wang J., Du Yu, Wang J. LSTM based long-term energy consumption prediction with periodicity. *Energy*, 2020, vol. 197, Article 117197.
- Wang R., Lu Sh., Feng W. A novel improved model for building energy consumption prediction based on model integration. *Applied Energy*, 2020, vol. 262, Article 114561.
- Farhadi P., Golmohammadi A., Malvajerdi A., Shahgholi G. Tire and soil effects on power loss: Measurement and comparison with finite element model results. *Journal of Terramechanics*, 2020, vol. 92, pp. 13–22.
- Bretas A., Rossoni A., Trevizan R., Bretas N. Distribution networks nontechnical power loss estimation: A hybrid data-

- driven physics model-based framework. *Electric Power Systems Research*, 2020, vol. 186, Article 106397.
14. Nappu M., Arief A. Network Losses-Based Economic Redispatch For Optimal Energy Pricing In A Congested Power System. *Energy Procedia*, 2016, vol. 100, pp. 311–314.
  15. Fantauzzi M., Lauria D., Mottola F., Scalfati A. Sizing energy storage systems in DC networks: A general methodology based upon power losses minimization. *Applied Energy*, 2017, vol. 187, pp. 862–872.
  16. Hartmann B., Farkas C. Energy efficient data centre infrastructure—Development of a power loss model. *Energy and Buildings*, 2016, vol. 127, pp. 692–699.
  17. Routray A., Mistry K., Arya S. Wake analysis on wind Farm power generation for loss minimization in radial distribution system. *Renewable Energy Focus*, 2020, vol. 34, pp. 99–108.
  18. Davidov S., Pantoš M. Optimization model for charging infrastructure planning with electric power system reliability check. *Energy*, 2019, vol. 166, pp. 886–894.
  19. Afzali P., Keynia F., Rashidinejad M. A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders. *Energy*, 2019, vol. 171, pp. 701–709.
  20. Rebello S., Yu H., Ma L. An integrated approach for system functional reliability assessment using dynamic bayesian network and hidden Markov model. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, vol. 180, pp. 124–135.

*Received: 16 June 2021.*

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

**Roman V. Klyuev**, Dr. Sc., chief of industrial power supply department, Moscow Polytechnic University.

**Vladimir I. Golik**, Dr. Sc., professor, North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University).

**Igor I. Bosikov**, Cand. Sc., assistant professor, North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University).

**Oksana A. Gavrina**, Cand. Sc., assistant professor, North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University).



УДК 552.113

## ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ, ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ И ТИПЫ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ УЧАСТКОВ ЭМИ И ЕЛЕНА ЭПИТЕРМАЛЬНОГО РУДНОГО ПОЛЯ СВЕТЛОЕ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

Левочская Дарья Валентиновна<sup>1,2</sup>,  
levochskayaDV@polymetal.ru

Якич Тамара Юрьевна<sup>1</sup>,  
cherkasovatu@tpu.ru

Лесняк Дмитрий Викторович<sup>1,2</sup>,  
lesnyakdv@polymetal.ru

Ананьев Юрий Сергеевич<sup>1</sup>,  
AnanyevYS@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК»,  
Россия, г. Хабаровск, ул. Муравьева-Амурского, 18.

**Актуальность** исследования определяется получением новых данных о вещественном составе, текстурно-структурных особенностях, гидротермально-метасоматической зональности, флюидном режиме и типах золотого оруденения двух наиболее контрастных участков эпитеpмального поля Светлое (Хабаровский край), образованных в разновозрастных материнских породах позднемелового возраста ( $K_2$ ) основного состава хетаниской свиты коньяк-сантонского яруса (участок Эми) и несогласно перекрывающих их породах кислого состава уражской свиты кампан-маастрихского яруса (участок Елена). Выбранные объекты характеризуются различным уровнем эрозионного среза и наиболее полно отражают разнообразие метасоматитов эпитеpмального поля Светлое от малоизмененных пород хетанинской свиты в пределах участка Эми до сильно измененных, в том числе гипергенными процессами, пород кислого состава, преобладающих на территории участка Елена. Полученные данные играют важную роль для установления класса эпитеpмальных месторождений, прогноза оруденения на глубину, а также могут быть использованы для выявления поисковых критериев и признаков аналогичных объектов как на территории Охотско-Чукотского вулканического пояса, так и за его пределами. **Целью** настоящей работы является изучение гидротермально-метасоматической зональности, вещественного состава, текстурно-структурных особенностей, флюидного режима, а также форм нахождения золота эпитеpмального рудного поля Светлое на примере двух участков – Эми и Елена. **Объектами** исследования являются руды, метасоматиты и слабоизмененные исходные породы в виде керновых, штуфовых и скопковых проб, отобранных в результате проведения научно-исследовательских работ из восьми скважин и двух действующих карьеров. Породы изучены **методами** оптической и электронной микроскопии с применением энергодисперсионной спектроскопии, а также методами рентгено-дифракционного анализа, микротермометрии и рамановской спектроскопии. В результате проведенных исследований установлено, что метасоматическая зональность эпитеpмального поля Светлое включает осевую зону остаточного кварца (вторичные кварциты с различными текстурно-структурными особенностями – мозаичный, перистый, колломорфный, крустификационный) и ореол переслаивающихся линейно-вытянутых зон метасоматитов (алуитовые и дикиитовые кварциты), сменяющихся на большем удалении от осевой зоны серицитовыми и иллит-хлоритовыми метасоматитами. Главная и основная доля минерализации связана с монокварцитами. Морфология рудных тел представлена субпластовыми линейными залежами килевидной формы с грибовидными раздувами в палеожерловинах до 110 м. Средняя мощность рудных тел варьирует от 12 до 60 м, длиной до 700 м при ширине 100...240 м. Падение рудных зон пологое, вблизи палеожерловин крутое с неравномерным или весьма неравномерным характером распределения полезного компонента. Среднее содержание золота в рудах 2,5 г/т. Состав гипогенной сульфидной минерализации представлен сульфидами полиметаллов Cu, Pb, Zn, Fe в виде пирита, галенита, сфалерита, халькопирита и теннантит-тетраэдрита. В пределах рудных тел участка Эми минеральная ассоциация сульфидов гидротермальной стадии составляет более 5 об. %, отличается разнообразием и обилием теллуридов. Золотое оруденение представлено двумя типами: Au-Ag и Au-Ag-теллуридным. Au-Ag руды представлены первичными рудами со средней пробой ~ 900 ‰, развитыми в пределах участка Эми, и вторичными (окисленные) рудами с пробой до 1000 ‰, преобладающими на участке Елена. По характеру и составу газовой-жидких включений в кварце гидротермально-рудный процесс на участке Эми протекал при температурах 260...330 °С. Микрокриотермометрические эксперименты участка Елена указывают на температурный интервал гидротермального процесса 200...240 °С. По вещественному составу измененных пород, гипогенной сульфидной ассоциации и флюидному режиму эпитеpмальное поле Светлое относится к сульфатно-кислотному и умеренно-кислотному (HS-IS) типу, обнаруживающему перспективу обнаружения порфирового оруденения на глубину.

### Ключевые слова:

Гидротермально-метасоматическая зональность, эпитеpмальные месторождения золота, текстурно-структурные особенности, флюидный режим, эпитеpмальное рудное поле Светлое, Охотско-Чукотский вулканический пояс.

## Введение

Эпитермальные месторождения золота относятся к низкотемпературным (<300 °С) месторождениям малых глубин (<1 км), приуроченным к конвергентным границам активных континентальных окраин [1–8]. Первоначально понятие «эпитермальные месторождения» было введено В. Лингредом [1] как низкотемпературные (<200 °С) месторождения золота, тесно связанные с обильным проявлением теллуридов, антимонидов и селенидов. Впоследствии температурный режим образования эпитермальных месторождений был увеличен до 300 °С и они стали условно разделяться на три типа в зависимости от состава и характера растворов, участвующих в их формировании: кислотный (high sulfidation – HS), умеренно-кислотный (intermediate sulfidation – IS) или низко-кислотный (щелочной) (low sulfidation – LS) [5, 7, 9]. Важную роль в типизации эпитермальных месторождений играет характер метасоматических преобразований, их текстурно-структурные особенности, вещественный состав гипогенных сульфидов и флюидный режим.

Изучение особенностей вещественного состава и характера зональности околорудных метасоматитов и руд эпитермального поля Светлое на примере двух участков Эми и Елена представляет собой весьма актуальную задачу, учитывая тот факт, что нередко эпитермальные месторождения золота и в частности их «литокапы (lithocaps)» представляют собой верхние части единой продолжающейся на глубине эпитермально-порфировой системы [10]. Под «литокапами (lithocaps)» понимают каменистые покровы (шляпы), центральными частями которых являются области остаточного кварца и ореолы кварц-алунитовых метасоматитов. Они формируются на глубинах менее 500 м от палеоповрхности и контролируются зонами подводящих каналов [7, 11]. Несмотря на то, что согласно данным И.Н. Кигая на территории Востока Азии (Хабаровский край, Приморье, Япония) эпитермальные золото-серебряные месторождения не обнаруживают пространственной и возрастной связи с медно-порфировыми месторождениями ввиду отсутствия последних [12], единичные крупные порфировые месторождения, такие как местоождения Малмыж и Песчанка, на территории Дальнего Востока России все же известны, что повышает потенциал обнаружения последних в пределах изучаемой площади.

Идентификация метасоматической зональности золоторудных месторождений играет важную роль в понимании процессов гидротермального рудообразования [13, 14]. Эта информация может быть использована для разработки поисковых критериев и признаков аналогичных объектов как на территории Охотско-Чукотского вулканического пояса, так и за его пределами.

В статье рассматриваются два участка эпитермального рудного поля Светлое, наиболее интересных с точки зрения разнообразия и полноты проявлений гидротермально-метасоматических преобразований рудовмещающих пород кислой серии уракской

свиты (участок Елена), несогласно перекрывающих более ранние средне-основного состава породы хетанинской свиты (участок Эми). Участки отражают различный уровень эрозионного среза и, как следствие, различную специфику гидротермально-метасоматических преобразований, вещественный и минеральный состав руд, различный флюидный режим, что наиболее достоверно позволит классифицировать рудное поле Светлое и оценить его потенциал оруденения на глубину.

## Геолого-структурная позиция золоторудного поля Светлое

Эпитермальное золоторудное поле Светлое приурочено к Ульинскому прогибу, сложенному меловыми вулканическими образованиями Охотско-Чукотского вулканического пояса [15, 16] и занимает две палеовулканические структуры центрального типа (рис. 1). Эти вулканические постройки разновозрастные – северо-западная (вмещает участок Эми) хетанинского времени, а юго-восточная, более молодая, (участки Елена, Тамара, Людмила и Лариса) ураксского времени. Хетаниская свита представлена андезитами, андезибазальтами, их агломератовыми лавами, реже туфами. Наиболее широко развиты пироксеновые андезиты темно-серого, почти черного цвета.

Уракская свита несогласно залегает на размытых породах хетанинской свиты. Она сложена стекловатыми и кислыми породами риолитового состава, дацитами, белыми, серовато-сиреневыми и кремво-желтыми игнимбритами, а также различными туфами и туфоловами (рис. 1).

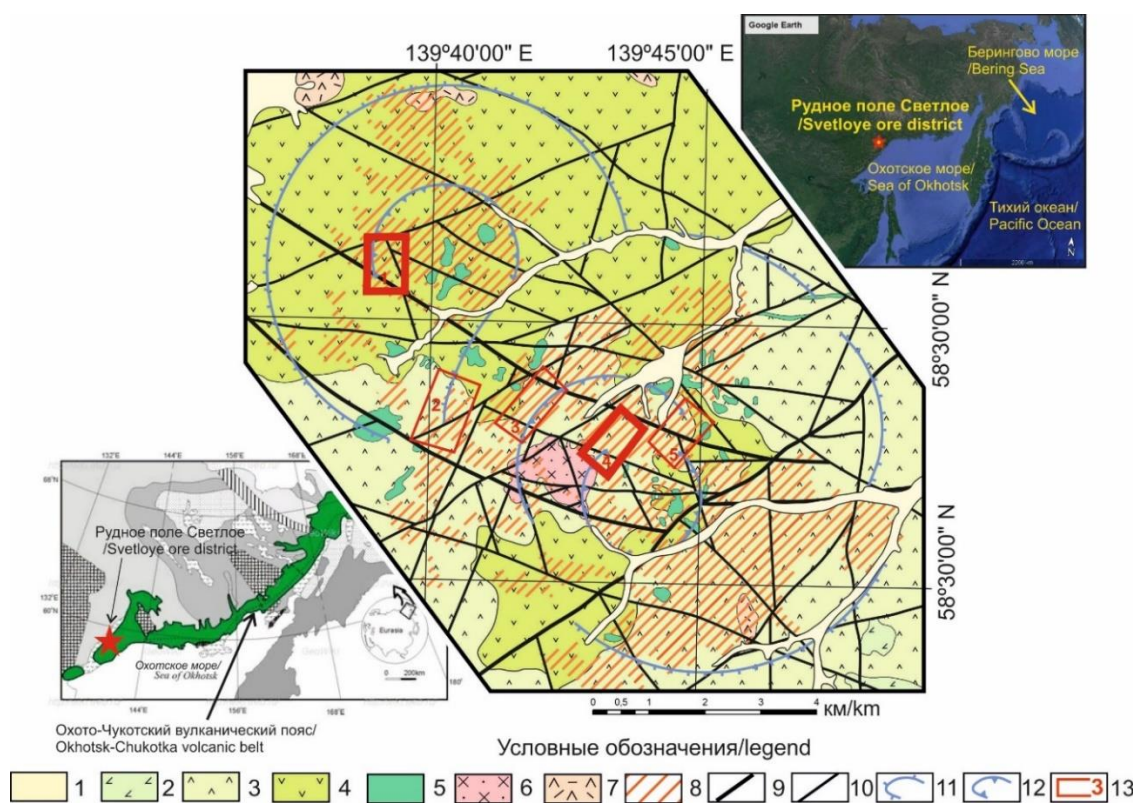
Разрывная тектоника широко распространена в пределах Светлинского рудного поля. Выделяются продольные (относительно простирания Охотско-Чукотского вулканического пояса) региональные северо-восточные, крупные поперечные северо-западные разрывы. Субвулканические интрузии и две палеовулканические постройки с кальдерами проседания тяготеют к узлам сопряжения. В кальдерах этих палеовулканов и на их склонах встречаются различные метасоматиты, в том числе вторичные кварциты. Области с промышленно значимой золотой минерализацией контролируются зонами сочленениями кольцевых разломов, ограничивающих кальдеры проседания, с разломами северо-западного простирания [17–19].

## Методы исследования

Для изучения минерального состава и петрографических особенностей частично измененных пород, руд и метасоматитов в ходе полевых работ было отобрано порядка 250 керновых, штупфных и сколковых проб из восьми скважин и двух карьеров с двух исследуемых участков. Основная часть проб отбиралась с шагом не более 3 м, охватывая все петрографические разности из керна четырех скважин участка Елена и аналогичного количества скважин участка Эми. Также были взяты сколковые пробы в бортах карьеров Елена и Эми.

Из образцов были изготовлены шлифы и аншлифы для определения микротекстурных и структурных особенностей, общей минеральной ассоциации, точной идентификации минералов и их ассоциаций. Микроструктурный и элементный анализ проводился на оптическом микроскопе Carl Zeiss и на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU (Чехия, TESCAN), оснащенный приставкой для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) Oxford X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа было 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 4...11,5 нА. Локальный рентгеноспектральный анализ выполнялся с предварительной калибров-

кой интенсивности зонда (11,4...11,5 нА) по кобальтовому стандарту при рабочем (фокусном) расстоянии 15 мм. СЭМ фотографии накапливались для двух основных детекторов: вторичных электронов (SE – secondary electrons) и обратно-рассеянных электронов (BSE – backscattered electrons), в лаборатории отделения геологии (НИ ТПУ, г. Томск). Глинистые минералы определялись дополнительно с использованием рентгенодифракционного анализа (РДА) на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser с CuK излучением. Порошковые пробы размера менее 10 мкм сканировались в интервале углов  $2\theta$   $3,70^\circ$  с шагом  $0,02^\circ$ , скоростью сканирования 2 с/точка при параметрах измерения 40 кВ и 40 мА.



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта рудного поля Светлое. Составлена с использованием материалов Б.А. Новоселова и ООО «ПД РУС» с добавлениями и корректировками авторов: 1 – современные аллювиальные отложения ( $Q_4$ ); 2 – андезитовые базальты хакаринской свиты ( $K_2$ ); 3 – лавы, туфы, игнимбриты уракской свиты ( $K_2$ ); 4 – андезитовые лавы, андезитобазальты, андезитовые туфы хетанинской свиты ( $K_2$ ); 5 – штоки и дайки базальтовых андезитов хакаринского базальтового комплекса ( $K_2$ ); 6, 7 – уракский дацит-риолитовый комплекс ( $K_2$ ); 6 – гранодиорит-порфировые штоки; 7 – дацитовые штоки и дайки; 8 – области распространения вторичных кварцитов и других метасоматитов; 9, 10 – разломы: 9 – региональные; 10 – другие; 11 – палеовулканические структуры; 12 – структуры проседания; 13 – участки рудного поля: 1 – Эми, 2 – Людмила; 3 – Тамара, 4 – Елена, 5 – Лариса

**Fig. 2.** Schematic geological map of the Svetloe ore district. Drawn up by the authors using materials of B.A. Novoselov and «PD RUS» Limited liability Company: 1 – alluvial deposits ( $Q_4$ ); 2 – basaltic andesite of the Khakar Suite ( $K_2$ ); 3 – lavas, tuffs, ignimbrites of the Urak Suite ( $K_2$ ); 4 – lavas of andesites, basaltic andesites, andesites tuffs of the Khetanian Suite ( $K_2$ ); 5 – stocks and dikes of basaltic andesites of the Khakarinsk basalt complex ( $K_2$ ); 6, 7 – Urak dacite-rhyolite complex ( $K_2$ ); 6 – stock of granodiorite-porphyrus; 7 – dacite stocks and dikes; 8 – areas of residual quartz and metasomatic alteration; 9, 10 – faults: 9 – regional; 10 – others; 11 – volcanic structures; 12 – subsidence zones; 13 – areas of deposits: 1 – Emmy, 2 – Lyudmila, 3 – Tamara, 4 – Elena, 5 – Larisa

Для определения температур фазовых переходов, солёности и состава газовой-жидких включений проводилась микротермометрия и рамановская спектрометрия двуполяризованных пластин. Микротермомет-

рические исследования флюидных включений проводились с использованием криотермокамеры Lincam THMSG 600 (Великобритания), совмещенной с оптическим микроскопом Carl Zeiss Axio A1, позволяю-

щей производить измерения температур фазовых переходов в интервале от  $-196$  до  $+600$  °С и наблюдать за ними при увеличениях до  $500\times$ . При достижении предполагаемых диапазонов фазовых переходов шаг нагрева снижался до  $0,1$  °С/мин при точности измерения  $0,2$  °С для криометрии и  $0,5$  °С для термометрии.

Рамановская спектроскопия осуществлялась с помощью конфокального рамановского спектрометра Thermo Fisher Scientific DXR2. Все измерения проводились при длине волны лазера  $785$  нм и мощности  $20...25$  мВт. Спектры обычно получали в течение  $5$  с для диапазона  $0...3,364$  см<sup>-1</sup> с трехскоростным накоплением.

### Результаты и их интерпретация

Гидротермально-метасоматическая зональность участков Елена и Эми

Золоторудное поле Светлое характеризуется разнообразием гидротермально-метасоматических образований, развивающихся по вулканогенным породам преимущественно кислого состава уракской свиты и, реже, среднего и основного состава хетанинской свиты. В результате петрографического анализа более  $160$  проб керна скважин с участка Елена и Эми с проведением дополнительных РДА анализов отдельных филлосиликатов были выделены следующие типы метасоматитов: вторичные кварциты (монокварциты, алунитовые, диккитовые, алунит-диккитовые, серицитовые), иллит-хлоритовые и гидрослюдистые кварциты (таблица). Исходные породы были обнаружены только в пределах участка Эми. Они представлены андезитами, андезитами и туфами, преимущественно андезитового состава. Во всех исследованных вулканических образованиях в разной степени проявлены метасоматические изменения, выраженные, прежде всего, в замещении полевых шпатов и темноцветных минералов (роговая обманка, биотит) глинистыми и гидрослюдистыми минералами. Последние можно интерпретировать как аргиллитизацию.

В пределах всего рудного поля Светлое вторичные кварциты слагают разобщенные в плане многослойные залежи неправильной вытянутой формы, имеющие наклонное залегание. Выделяются три группы монокварцитов – массивные, пористые, брекчированные. Распространение тех или иных структурно-текстурных разновидностей монокварцитов отражает изменчивость состава и строения материнских пород. Пористые и брекчированные разновидности развиваются по наиболее проницаемым породам (например, крупнообломочные туфы, вулканические брекчии), в то время как массивные – по слабопроницаемым (пелитовые туфы, дациты). Наибольшее распространение имеют пористые монокварциты, поровое пространство в которых может оставаться пустым либо быть заполненным кварцем более поздних генераций, рудной минерализацией, сульфатами, филлосиликатами (глинистыми минералами) и др.

В монокварцитовой залежи присутствуют прослои и линейно-вытянутые зоны, сложенные диккитовыми, реже алуниновыми, кварцитами.

Диккит и алунит здесь образуют отдельные включения и их агрегаты, которые заполняют поровое пространство. Значительно реже они развиваются по трещинам, образуя как мономинеральные, так и кварц-диккит-алуниновые прожилки. Процентное содержание диккита и алунита здесь, как правило, составляет  $15-20$  %.

Монокварцитовые залежи обрамляются алуниновыми кварцитами, при этом на локальных участках (участок Елена, Скв. 2, рис. 2, А, рис. 3) отмечается переход монокварцитов к диккитовым, алунит-диккитовым и алуниновым кварцитам. Внутри алуниновой залежи наблюдается зональное распределение алунита в микрозернистом кварцевом базисе. Это выражается в постепенном увеличении содержания алунита от периферии ( $20-25$  %) к осевой части залежи (до  $50$  %). Рост содержания алунита сопровождается уменьшением размеров кристаллов и их более равномерным рассредоточением в основной массе породы – в периферийных частях залежи алунит представлен порфиробластовыми включениями длиннопризматических кристаллов размером до  $1$  мм, в осевой части – тонкозернистым агрегатом. В алуниновых кварцитах также отмечаются прослои, представленные монокварцитами (вероятно, реликтовые формы от сульфат-насыщенных растворов) и алунит-диккитовыми кварцитами. На участке Эми монокварциты оконтуриваются серицитовыми кварцитами (рис. 2, Б, рис. 4).

Через алунит-диккитовые разности алуниновые кварциты переходят в диккитовые, которые обрамляют залежь вторичных кварцитов, слагая её прикровельную и приподшвенную зоны. На локальных участках диккитовые кварциты оконтуривают монокварциты. Диккит представлен мелкочешуйчатым агрегатом, который заполняет поровое пространство в микрозернистой кварцевой основной массе, а также замещает реликты кристаллокластов. В переходных зонах (к монокварцитам, алуниновым и алунит-диккитовым кварцитам) отмечается развитие относительно крупных таблитчатых кристаллов диккита, которые формируют порфиробластовые включения и заполняют трещины, образуя мономинеральные или алунит-диккитовые прожилки. Диккитовые залежи подстилаются иллит-хлоритовыми метасоматитами, содержание кварца в которых в большинстве случаев не превышает  $30$  %. В пределах залежи вторичных кварцитов участка Эми метасоматически измененные вулканические и вулканогенно-обломочные образования слагают крутопадающие линейно-вытянутые зоны, являющиеся останцами первичных вмещающих пород. Эти зоны, ввиду их слабой метасоматической переработки, по-видимому, отражают механически устойчивые и наименее проницаемые области.

Морфология рудных тел и рудовмещающие метасоматически-измененные породы

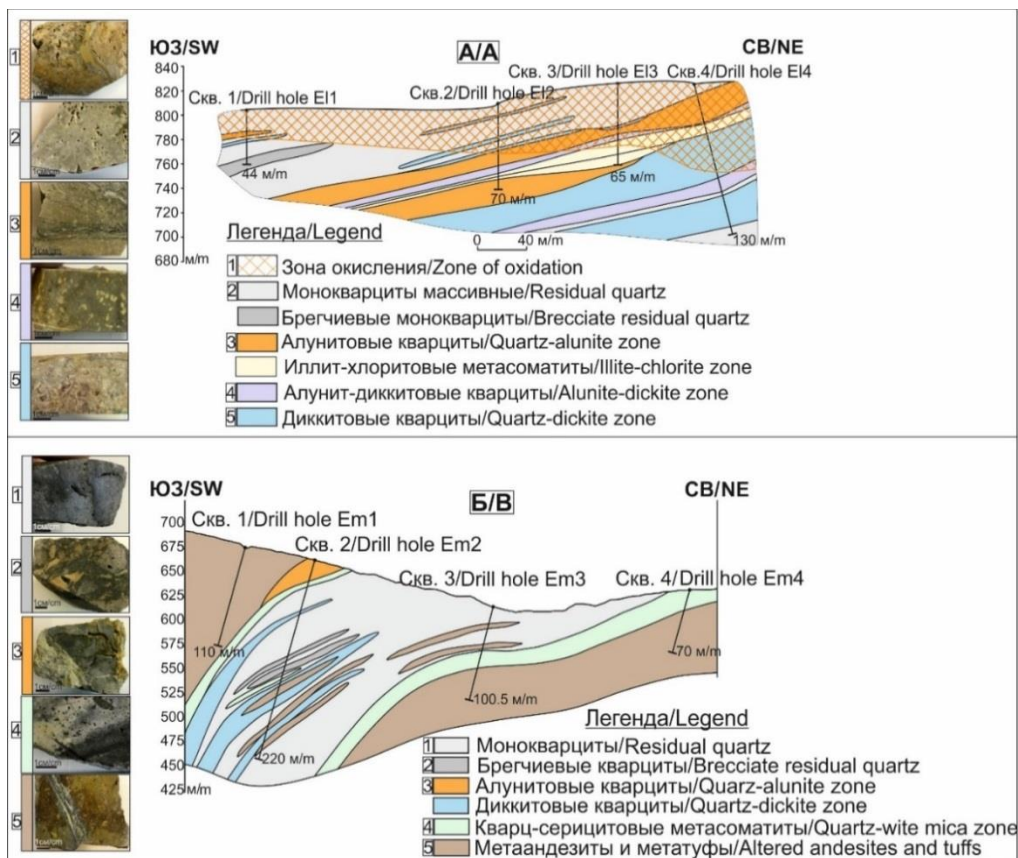
Рудовмещающими являются монокварциты (массивные, пористые, брекчированные), алуниновые кварциты, алунит-диккитовые кварциты, диккитовые кварциты, иллит-хлоритовые аргиллитизиты.

**Таблица.** Сводная петрографическая характеристика гидротермально-метасоматических, вулканических и вулканогенно-осадочных образований участка Елена и Эми эпитермального золоторудного поля Светлое

**Table.** Integrated petrographic characteristics of hydrothermal-metasomatic, volcanic and volcanogenic-sedimentary formations of the Elena and Emmy deposits of the Svetloe gold ore epithermal district

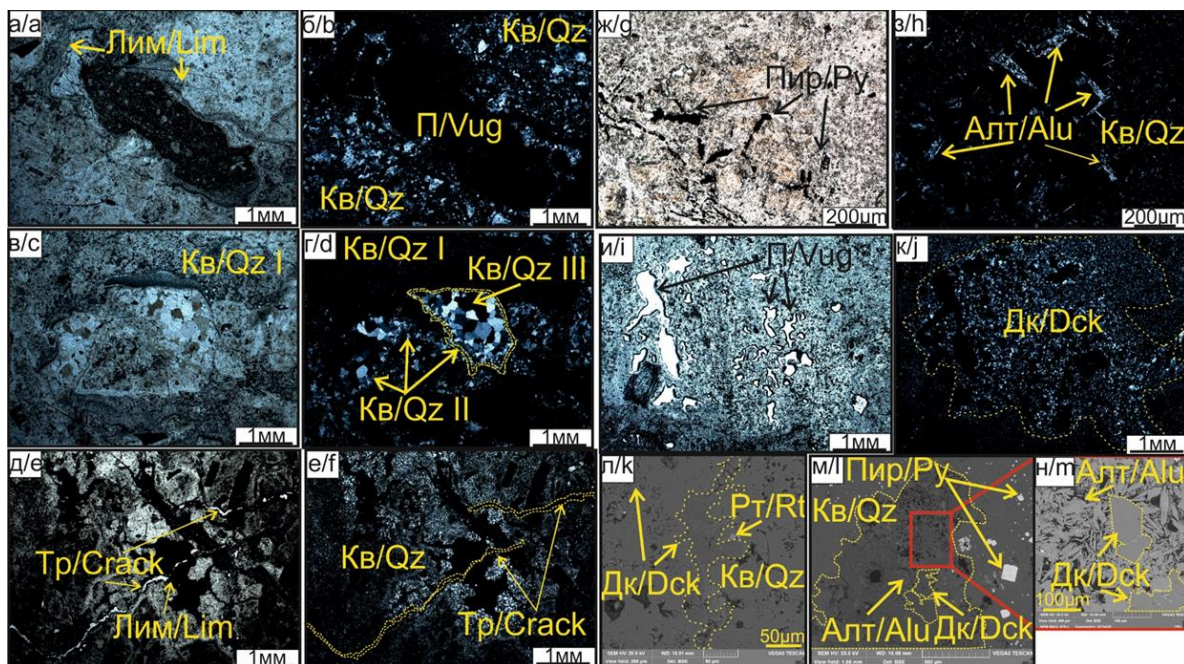
Типы гидротермально-метасоматических образований Types of hydrothermal-metasomatic formations	Минеральный состав Mineral composition	Структуры пород Rock structures	Текстуры пород Rock textures	Текстуры кварца Quartz textures
Участок Елена/Elena deposit				
Монокварциты массивные Massive residual quartz	Кварц/quartz 80...100 %, глинистые минералы/phyllsilicate 0...10 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...15 %	Микрозернистая, реликтовая, бластопорфировая Microgranular, relict, blastoporphyritic	Неоднородная, полосчатая, пятнистая, гнездовая, трещиноватая, прожилковая Heterogeneous, banded, spotted, nesting, fractured, veined	Крустификационная, мозаичная Crustified, mosaic
Монокварциты пористые Residual quartz with vuggy texture	Кварц/quartz 80...100 %, глинистые минералы/phyllsilicate 0...5 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...20 %	Неравнозернистая, реликтовая бластопорфировая Inequigranular, relict blastoporphyritic	Неоднородная, пористая, пятнистая, трещиноватая, сплошная, прожилковая Heterogeneous, porous, spotted, fissured, platy, veined	Крустификационная, мозаичная, колломорфная Crustified, mosaic, collomorphic
Монокварциты брекчированные Residual quartz with brecciated texture	Кварц/quartz 75...85 %, глинистые минералы/phyllsilicate 10...15 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 5...10 %	Неравнозернистая, реликтовая бластопорфировая Inequigranular, relict blastoporphyritic	Неоднородная, брекчиевидная, пятнистая, трещиноватая Heterogeneous, brecciated, spotted, fractured	Мозаичная, крустификационная, колломорфная Mosaic, crustified, collomorphic
Алунитовые кварциты Alunite quartz zone	Кварц/quartz 50...70 %, алунит/alunite 20...50 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...20 %	Неравнозернистая, микрозернистая гетеробластовая, реликтовая бластопорфировая, порфиробластовая Inequigranular, micro-grained heteroblastic, relict blastoporphyritic, porphyroblastic	Неоднородная, пористая, трещиноватая, пятнистая Heterogeneous, porous, fractured, spotted	Крустификационная, мозаичная Crustified, mosaic
Алунит-диккитовые кварциты Alunite dickite quartz zone	Кварц/quartz 30...50 %, алунит/alunite 20...35 %, диккит/dickite 20...35 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 5...10 %	Микрозернистая, гетеробластовая, бластопорфировая, порфиробластовая, гранобластовая Microgranular, heteroblastic, blastoporphyritic, porphyroblastic, granoblastic	Неоднородная, пористая, трещиноватая, пятнистая, прожилковая Heterogeneous, porous, fractured, spotted, veined	Крустификационная, мозаичная Crustified, mosaic
Диккитовые кварциты Dickite quartz zone	Кварц/quartz 50...70 %, диккит/dickite 20...50 %, карбонатно-гидрослюдистый агрегат/carbonate-hydromica aggregate 0...10 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...10 %, барит/barite 0...1 %	Неравнозернистая, микрозернистая, гетеробластовая Inequigranular, micro-grained, heteroblastic	Неоднородная, пористая, трещиноватая, пятнистая Heterogeneous, porous, fractured, spotted	Крустификационная, мозаичная Crustified, mosaic
Участок Эми/Emmy deposit				
Монокварциты массивные Massive residual quartz	Кварц/quartz 80...100 %, глинистые минералы/phyllsilicate 0...10 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...15 %	Неравнозернистая, реликтовая бластопорфировая, гетеробластовая Inequigranular, micro-grained, heteroblastic	Неоднородная, полосчатая, гнездовая, трещиноватая, прожилковая Heterogeneous, banded, nested, fractured, veined	Колломорфная, перистая, крустификационная, мозаичная Collomorphic, feathery, crustified, mosaic
Монокварциты пористые Residual quartz with vuggy texture	Кварц/quartz 80...100 %, глинистые минералы/phyllsilicate 0...10 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...15 %	Неравнозернистая Inequigranular	Неоднородная, гнездовая, пористая, трещиноватая Heterogeneous, nested, porous, fractured	Колломорфная, перистая, крустификационная, мозаичная Collomorphic, feathery, crustified, mosaic
Монокварциты брекчированные Brecciate residual quartz with vuggy texture	Кварц/quartz 75...85 %, глинистые минералы/phyllsilicate 10...15 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 5...10 %	Микрозернистая Microgranular	Неоднородная, брекчиевидная, пятнистая, трещиноватая Heterogeneous, brecciated, spotted, fractured	—

Алунитовые кварциты Alunite quartz zone	Кварц/quartz 60...70 %; алу- нит/alunite 30...40 %	Микрозернистая, гетеробласто- вая, порфиробластовая Microgranular, heteroblastic, porphyroblastic	Неоднородная, про- жилковая, пятнистая Heterogeneous, veined, spotted	Мозаичная Mosaic
Диккитовые квар- циты Dickite quartz zone	Кварц/quartz 75...80 %, дик- кит/dickite 15 %, рудные мине- ралы/opaque minerals 5...10 %	Неравнозернистая, гетеробластовая Inequigranular, heteroblastic	Неоднородная, тре- щиноватая, прожил- ковая Heterogeneous, fractured, veined	Мозаичная Mosaic
Гидрослюдистые кварциты Hydro-mica quartz zone	Кварц/quartz 65...70 %, сери- цит/white mica 25...30 %, руд- ные минералы/opaque minerals 5 %	Микрозернистая, порфиробластовая Microgranular, porphyroblastic	Пористая, трещиноватая, прожилковая, пятнистая Porous, fissured, veined, spotted	Крустификацион- ная, мозаичная Crustified, mosaic
Метаандезиты Altered andesites	Плагиоклаз/plagioclase 50...75 %, вулканическое стек- ло/volcanic glass 15...35 %, кальцит/calcite 5...30 %, роговая обманка/hornblende 5...10 %, биотит/biotite 5...10 %, хло- рит/chlorite 5 %, серицит/ white mica 5 %, рудные мине- ралы/opaque minerals <1...15 %	Порфировая Porphyry	Прожилковая, трещиноватая Veined, fractured	
МетатUFFы Altered tuffs	Плагиоклаз/plagioclase 15...40 %, вулканическое стек- ло/volcanic glass 20...70 %, кальцит/calcite 10...40 %, кварц/quartz 5...15 %, ил- лит+хлорит+серицит/illite+chlori- te+white mica 15...50 %, рудные минералы/opaque minerals <1...20 %	Литокластическая, кристалло- кластическая, литокристалло- кластическая, фельзитовая Lithoclastic, crystalloclastic, lithocrystallineclastic, felsic	Массивная, пористая, флюидальная, про- жилковая Massive, porous, fluid, veined	



**Рис. 2.** Схематические разрезы участков Елена (А) и Эми (Б), показывающие вертикальную изменчивость гидротермально-метасоматических образований с наглядным представлением образцов метасоматитов (слева от разрезов)

**Fig. 2.** Schematic cross sections of alteration zonation within the Elena (A) and Emmy (B) deposits with demonstration of hand specimens (on the left side from the cross sections)



**Рис. 3.** Фотографии полированных шлифов метасоматитов участка Елена в параллельных (а, в, д, ж, и) и скрещенных (б, г, е, з, к) николях, а также обратно-отражённых электронах электронного сканирующего микроскопа (л–н). Пористые (П) монокварциты из поверхностной зоны окисления представлены кварцем (Кв) в ассоциации с лимонитом (Лим) (участок Елена, скв. 2, гл. 0,8 м) (а, б); увеличенный фрагмент пористого монокварцита, отражающий несколько поколений кварца (Кв): микрокристаллический (неразличимозернистый) (I), мелкозернистый – перистый, формирующий структуры обрастания (II), и мелкозернистый мозаичный (III) (участок Елена, скв. 2, гл. 0,8 м) (в, г); брежчиевые монокварциты (Кв) с брежчиево-цементной текстурой и обильным количеством трещин (Тр), частично заполненных гидроксидами железа (Лим) (участок Елена, скв. 2, гл. 11,3 м) (д, е); алунитовый (Алт) кварцит (Кв) с вкрапленностью рудных минералов, представленных преимущественно пиритом (Пир) (участок Елена, скв. 2, гл. 55,7 м) (ж, з); дикитовые кварциты (Кв), где дикит (Дк) заполняет гнезда и пустоты выщелачивания (П) в кварце (Кв) (участок Елена, скв. 4, гл. 61,3 м) (и, к); увеличенный фрагмент предыдущего образца дикитовых кварцитов в обратно-отраженных электронах сканирующего микроскопа, демонстрирующий зерно дикита (Дк) в ассоциации с рутилом (Рт) на фоне кварца (Кв) (участок Елена, скв. 4, гл. 61,3 м) (л); алунит (Алт)-дикитовые (Дк) кварциты (Кв) с вкраплениями пирита (Пир) кубического габитуса (участок Елена, скв. 2, гл. 41,3 м) (м); увеличенный фрагмент предыдущего участка, показывающий тесные взаимоотношения вытянутых кристаллов алунита с доменными агрегатами дикита, выполняющими пустоты выщелачивания в кварце (участок Елена, скв. 2, гл. 41,3 м) (н)

**Fig. 3.** Transmitted-light microphotographs of altered rocks within the Elena deposit in plane (a, c, e, g, i) and cross-polarized (b, d, f, h, j) light, and backscatter electron images (k–m). Residual quartz (Qz) with vuggy (Vug) texture from zone of oxidation represented by quartz (Qz) in association with limonite (Lim) (d. Elena, drill hole E12, depth 0,8 m) (a, b); an enlarged fragment of residual quartz, reflecting various generations of quartz (Q): microcrystalline (indistinguishable) (I), fine-grained – pinnate, forming fouling structures (II), and fine-grained mosaic (III) (d. Elena, drill hole E12, depth 0,8 m) (c, d); brecciate residual quartz (Qz) with a brecciate-cement texture and an abundant number of cracks in places filled with iron hydroxides (Lim) (d. Elena, drill hole E12, depth 11,3 m) (e, f); quartz-alunite (Alu) zone with dissemination of opaque minerals, represented mainly by pyrite (Py) (d. Elena, drill hole E12, depth 55,7 m) (g, h); dickite-quartz zone, where dickite (Dck) fills nests and cavities of leaching (Vug) in quartz (Qz) (d. Elena, drill hole E14, depth 61,3 m) (i, j); backscatter electron image of enlarged fragment of the previous dickite-quartz zone, demonstrated dickite grains (Dck) in the association with rutile (Rt) in quartz (Qz) (d. Elena, drill hole E14, depth 61,3 m) (k); alunite (Alu)-dickite (Dck) quartz (Qz) zone with dissemination cubic crystals of pyrite (Py) (d. Elena, drill hole E12, depth 41,3 m) (l); enlarged fragment of the previous section showing the close relationship of elongated alunite (Alu) crystals with domain structure aggregates of dickite (Dck), filling leaching cavities in quartz (d. Elena, drill hole E12, depth 41,3 m) (m)

Морфология рудных залежей представляет собой субпластовые линейные залежи килевидной формы с грибовидными раздувами. Параметры рудных залежей существенно изменчивые, длиной до 700 м и шириной 100...240 м, мощностью 12...60 м, с раздувами в палеожерловинах до 110 м, вертикальный размах достигает 300 м. Падение рудных зон пологое, вблизи палеожерловин крутое с неравномерным или весьма неравномерным характером распределения полезного компонента. Струк-

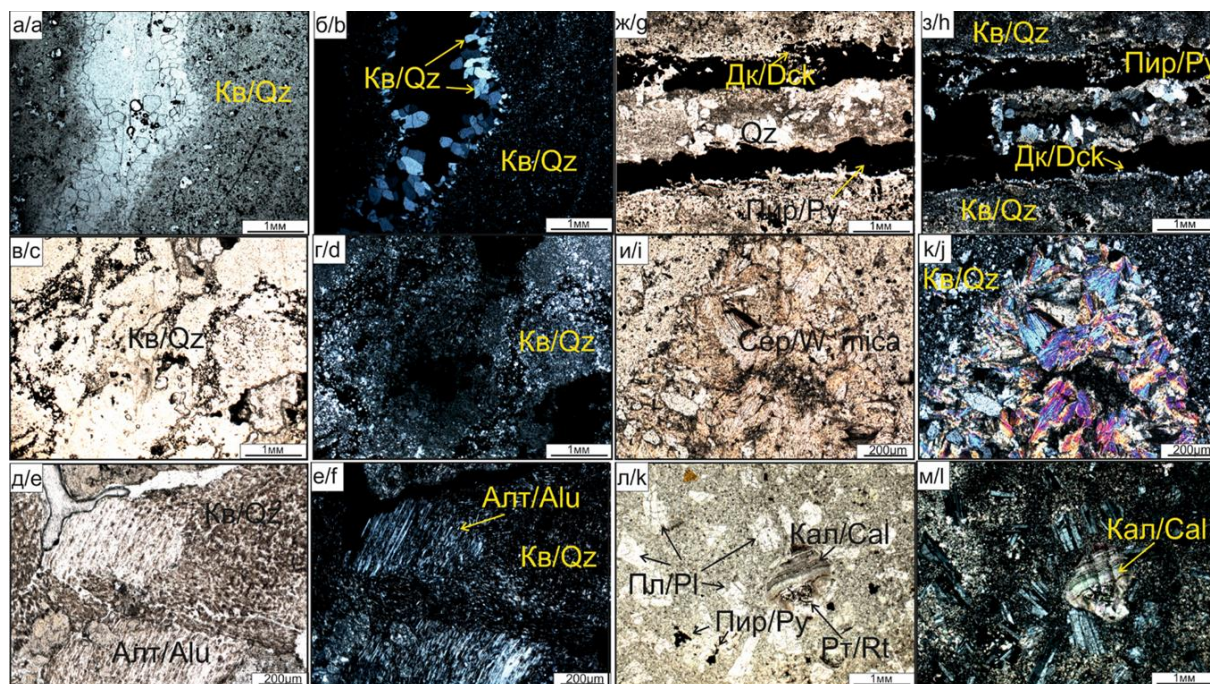
тура руд: микро- и мелкозернистая, порфириовидная, гипидиоморфнозернистая, колломорфная. Текстура руд: прожилковая (микропрожилковая), гнездовая, крустификационная, брежчиевидная, полосчатая.

#### Текстурные особенности кварца

Текстуры жильного кварца, наблюдаемого во всех разновидностях вторичных кварцитов, представлены четырьмя типами – крустификационный, мозаичный,

перистый, колломорфный (рис. 5). Наиболее широко распространен крустификационный кварц, развивающийся по стенкам порового пространства и трещин (рис. 5, а–в). Этот текстурный тип жильного кварца отмечен во всех вторичных кварцитах, за исключением брекчированных монокварцитов. Крустификационный кварц формировался преимущественно по открытому поровому пространству, отвечающему стадии кислотно-выщелачивания. Колломорфный (рис. 5, з), мозаич-

ный (рис. 5, д) и перистый (эвгедральный) (рис. 5, ж–к) жильный кварц формируется на более поздних стадиях гидротермального процесса при перенасыщении раствора, которое может происходить при его вскипании, а также при быстром падении температуры и/или давления [20]. Наиболее ранним из них является колломорфный кварц, который обрамляется более крупнокристаллическим кварцем мозаичной и перистой текстур (рис. 5, з).



**Рис. 4.** Фотографии полированных шлифов метасоматитов участка Эми в параллельных (а, в, д, ж, и, л) и скрещенных (б, г, е, з, к, м) николях. Пористые монокварциты представлены кварцем (Кв) различных морфологических типов – мозаичным и перистым (участок Эми, скв. 2, гл. 40,9 м) (а, б); брекчированные кварциты с повышенной трещиноватостью (участок Эми, скв. 2, гл. 109,8 м) (в, г); алунитовые (Алт) кварциты (участок Эми, скв. 2, гл. 13,6 м) (д, е); диктитовые (Дк) кварциты с прожилками пирита (Пир) (участок Эми, скв. 2, гл. 200 м) (ж, з); кварц-серицитовые (Сер) метасоматиты (участок Эми, скв. 3, гл. 62,5 м) (и, к); метаандезиты с реликтовыми вкрапленниками плагиоклазов (Пл) на фоне измененной основной массы стекла с вкрапленностью пирита (Пир) неправильной формы и зональным зерном кальцита (Кал) с вкрапленностью игольчатого рутила (Рт) (участок Эми, скв. 4, гл. 21,8 м) (л, м)

**Fig. 4.** Transmitted-light microphotographs of altered rocks within the Emmy deposit in plane (a, c, e, g, i, k) and cross-polarized (b, d, f, h, j, l) light. Residual quartz (Qz) with vuggy texture represented by mosaic and drusy varieties (d. Emmy, drill hole Em2, depth 40,9 m) (a, b); brecciated residual quartz with fracture pattern (d. Emmy, drill hole Em2, depth 109,8 m) (c, d); quartz-alunite (Alu) zone (d. Emmy, drill hole Em2, depth 13,6 m) (e, f); quartz-dickite (Dck) zone with veinlets of pyrite (d. Emmy, drill hole Em2, depth 200 m) (g, h); quartz-white mica (W.mica) zone (d. Emmy, drill hole Em3, depth 62,5 m) (i, j); altered andesites with disseminated irregularly shaped pyrite (Py) and zonal grain of calcite (Cal) contained needles of rutile (Rt) (d. Emmy, drill hole Em4, depth 21,8 m) (k, l)

#### Вещественный состав гипогенных сульфидов

Преобладающим сульфидом гипогенной гидротермальной стадии формирования обоих участков эпitherмального рудного поля Светлое является пирит  $(\text{Fe}_{0,87-1,13}, \text{Cu}_{0,0-0,12}, \text{As}_{0,0-0,02}, \text{Sb}_{0,0-0,06}, \text{S})_2$ , а также сульфиды полиметаллов, представленные галенитом  $(\text{Pb}_{0,89-1,12}, \text{Fe}_{0,0-0,14})\text{S}$ , сфалеритом  $(\text{Zn}_{0,74-1,0}, \text{Fe}_{0,01-0,11}, \text{Cu}_{0,01}, \text{Na}_{0,19})\text{S}$  и халькопиритом  $(\text{Cu}_{0,68-1,09}, \text{Fe}_{0,66-1,19})\text{S}_2$ , помимо перечисленных минералов широкое распространение, особенно в пределах участка Эми, получили блеклые руды ряда теннантит-тетраэдрита  $(\text{Cu}_{2,93-11,99}, \text{Fe}_{0,0-6,44}, \text{Zn}_{0-1,74}, \text{Ag}_{0,0-0,36})$

$(\text{Sb}_{0,0-3,88}, \text{As}_{0,0-4,0}, \text{Bi}_{0,0-0,51}, \text{Te}_{0,0-2,68})\text{S}_{13}$ . В пределах участка Елена пирит представлен преимущественно мелкими (~5 мкм) кристаллами кубического габитуса, не обнаруживающими примесей. Кристаллы сфалерита, галенита, халькопирита и блеклых руд имеют аналогичную пириту размерность в первые мкм.

Участок Эми отличает разнообразие гипогенной сульфидной ассоциации и ее процентное содержание в рудоносных прожилках более 5%. Пирит представлен несколькими морфологическими типами: колломорфным и кристаллическим сложного пентагондодекаэдрического и тетраэдрического габитусов. Он обнаруживает примеси меди до 6,0 вес. %, реже тел-



лура, селена, сурьмы. В тесной ассоциации с таким пиритом находятся халькопирит, блеклые руды теннантин-тетраэдритового ряда, голдфилдит ( $\text{Cu}_{9,93-12,0}\text{Fe}_{0,0-1,74}\text{Ag}_{0,0-0,36}(\text{Te}_{1,41-2,68}\text{Sb}_{0,0-2,54}\text{Bi}_{0,0-0,28}\text{As}_{0,0-1,28})\text{S}_{13}$ , хемусит ( $\text{Cu}_{5,46-6,27}\text{Fe}_{0,0-0,33}\text{Sn}_{0,75-1,07}(\text{Mo}_{0,93-1,32}\text{Sb}_{0,0-0,27})\text{S}_8$ , кавачулит  $\text{Bi}_{2,65-3,08}\text{Te}_{2,88-3,3}\text{Se}$ , теллуриды никеля (мелонит  $\text{Ni}_{0,92-1,00}\text{Te}_2$ ), свинца (алтаит  $\text{Pb}_{0,90}\text{Te}$ ), висмута (теллурувисмутин  $\text{Bi}_{1,82-1,93}\text{Te}_3$ ), сурьмы и висмута (теллурантимон  $\text{Sb}_{1,65-2,2}\text{Bi}_{0,15-0,7}\text{Te}_3$ ), ртути (колорадоит  $\text{Hg}_{0,77-0,94}\text{Te}$ ).

#### Типы золотого оруденения

Золотое оруденение эпитептермального рудного поля Светлое представлено двумя типами: Au-Ag и Au-Ag-теллуридным. Первый тип оруденения развит как в пределах участка Елена, так и на участке Эми, при этом проба золота различна. Этот тип оруденения представлен первичными и окисленными (переотложенными) рудами. Зона окисления, содержащая окисленные руды, широко развита в пределах участка Елена и варьирует в пределах от 50 до 120 м, она определяется по охристо-желтому цвету и обильному развитию минералов зоны гипергенеза, таких как лимонит, ярозит, сепиолит, гипсцит, брушит, микасаит и т. д. Окисленные руды представлены переотложенным высокопробным золотом с пробой до 1000 ‰, оно находится в ассоциации с самородным теллуридом, селеном и т. д., гидроокислами железа и ярозитом и относится к гипергенному переотложенному этапу формирования.

В пределах участка Эми встречаются первичные руды Au-Ag типа со средней пробой около 900 ‰, а также широко развит второй тип золотой минерализации, представленный теллуридами золота. Они обнаруживают определенную вертикальную зональность химического состава от наиболее высокосеребряных разностей, представленных ютенбогаардитом ( $\text{Ag}_{3,42-3,61}\text{Au}_{0,67-0,74}\text{Fe}_{0,16-0,29}\text{S}_2\text{Te}_{0,07-0,12}$ , штютцитом  $\text{Ag}_{4,43-5,14}\text{Au}_{0,06-0,07}\text{Fe}_{0,6}\text{Bi}_{0,15}\text{Te}_3$ , мутманнитом  $\text{Au}_{0,55}\text{Ag}_{1,26}\text{Fe}_{0,18}\text{Mo}_{0,05}\text{Te}_2$  и гесситом  $\text{Ag}_{1,71}\text{Au}_{0,1}\text{Te}$ , развитых в приповерхностных условиях (38...40 м) до наиболее обогащенных золотом на глубоких горизонтах (198...200 м) в виде калаверита  $\text{Au}_{0,71-0,91}\text{Ag}_{0,0-0,19}\text{Fe}_{0,0-0,19}\text{Cu}_{0,0-0,15}\text{Te}_2$ . Промежуточная разновидность теллурида золота наиболее распространенная в пределах участка Эми представлена сальванитом  $\text{Au}_{0,86-1,67}\text{Ag}_{0,4-2,31}\text{Fe}_{0,06-0,39}\text{Mo}_{0,2-0,77}\text{Ta}_{0,04-0,08}\text{Te}_4$ .

#### Флюидный режим

На современном уровне эрозионного среза в пределах рудного поля Светлое в формировании продуктивной залежи участвовал слабосоленый (0..0,5 мас. % NaCl-экв.) флюидный поток. Изученные двухфазовые включения установлены в позднем эвгедральном кварце перистого строения (рис. 5, ж-к, б а, б), алуниите (рис. 5, в), кальците (рис. 6, з). Соотношение газовой и жидкой фазы для двухфазных включений равно 1:3, 2:3. Газовая фаза в подобных включениях, согласно данным Раман-спектроскопии, представлена диоксидом углерода. В зонах роста призматического кварца наличие одновременно захваченных газовых

(рис. 6, д), газовой-жидких и жидких включений (рис. 5, е-з) указывает на процесс кипения, протекавший во флюидной системе в момент кристаллизации минералов. Наличие различных форм диоксида кремния и его текстур свидетельствует о смене pH среды вследствие кипения. Так, в результате резкого вскипания и потери флюидом газовой составляющей растворимость кремнезема резко падает и отлагается аморфный и скрытокристаллический кварц с коллоидными и крустификационно-полосчатыми текстурами (рис. 5, з). Такая структура кварца не является благоприятной для захвата первичных флюидных включений, тем не менее о процессе можно судить по вторичным включениям в ранее образованных минералах. Так, в скрытокристаллическом кварце участка Елена были зафиксированы многочисленные газовые ( $\text{CO}_2$ ) включения, состав которых диагностирован при помощи рамановского спектрометра, что подтверждает нахождение флюида в паровом (газовом) состоянии в момент формирования минерала. Учитывая совместное нахождение разнофазовых флюидных включений (на уровне одной пробы), минералообразующая система характеризовалась неоднократными условиями «вскипания» флюидов, источниками которых служили как гидротермальные потоки, так и метеорные воды, о чем свидетельствует низкая температура льда во вторичных включениях.

В пределах участка Эми гидротермально-рудный процесс протекал при температурах 260...340 °С. Относительно крупный размер газовой-жидких включений позволил проследить закономерное увеличение температур с глубиной в скв. 2. С двумя зонами максимальных температур гомогенизации в интервалах глубин 38...40 и 198...200 м связана интенсивная минерализация кварцитов. При этом по мере приближения по глубине к этим интервалам температура повышается. Так, в промежутке от 30...40 и от 50...200 м отмечается увеличение температуры гомогенизации газовой-жидких включений от 260 до 340 °С.

#### Обсуждение результатов

Метасоматическая зональность рудного поля Светлое и ее интерпретация

В пределах двух изучаемых участков – Елена и Эми – рудного поля Светлое, отражающих различный уровень эрозионного среза согласно принятым представлениям о моделях эпитептермальных систем [21] выделяется осевая зона остаточного кварца (вторичные кварциты с различными текстурно-структурными особенностями – мозаичный, перистый, колломорфный, крустификационный) и ореол переслаивающихся линейно-вытянутых зон метасоматитов (алунитовые и диккитовые кварциты), сменяющихся на большем удалении от осевой зоны серицитовыми и иллит-хлоритовыми метасоматитами. Рудно-метасоматический процесс приурочен к дегазации средне-кислого магматического очага и накладывался на поля вулканитов. Металлоносные флюиды поступали по зонам тектонического разуплотнения, кольцевым и радиальным разломам и в неравновесных условиях приводили к интенсивному преимущественно кислотному (местами близ нейтраль-

ному) метасоматозу в кальдерах проседания, на склонах и у основания палеовулканических аппаратов. В результате формировался так называемый ореол вторичных кварцитов. Мощные и протяженные поля монокварци-

тов, сменяющиеся алуниновыми кварцитами и наложением диккитовых или диккит-каолинитовых кварцитов в дистальном направлении переходят в хлоритовые, иллит-хлоритовые аргиллизиты.

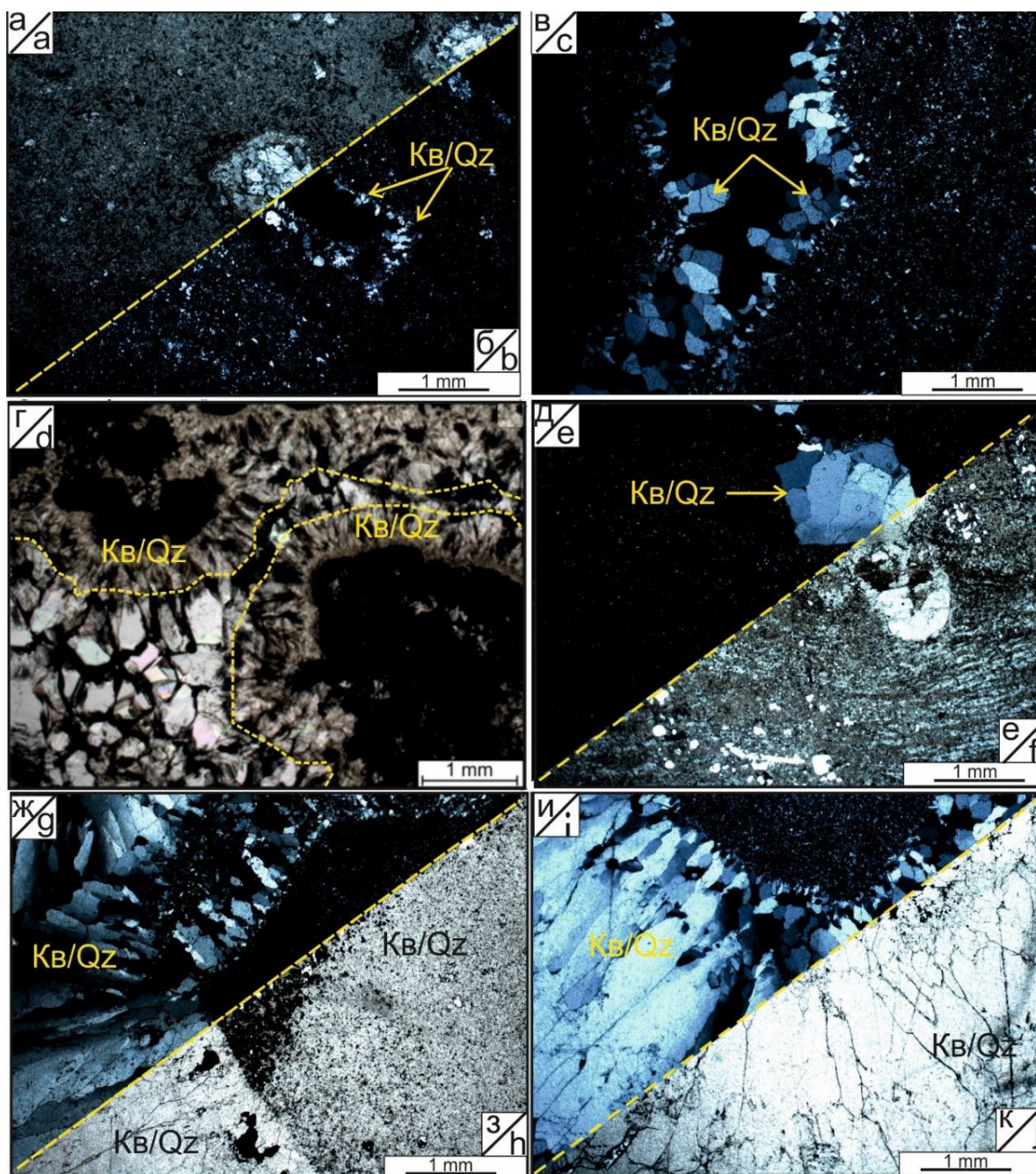


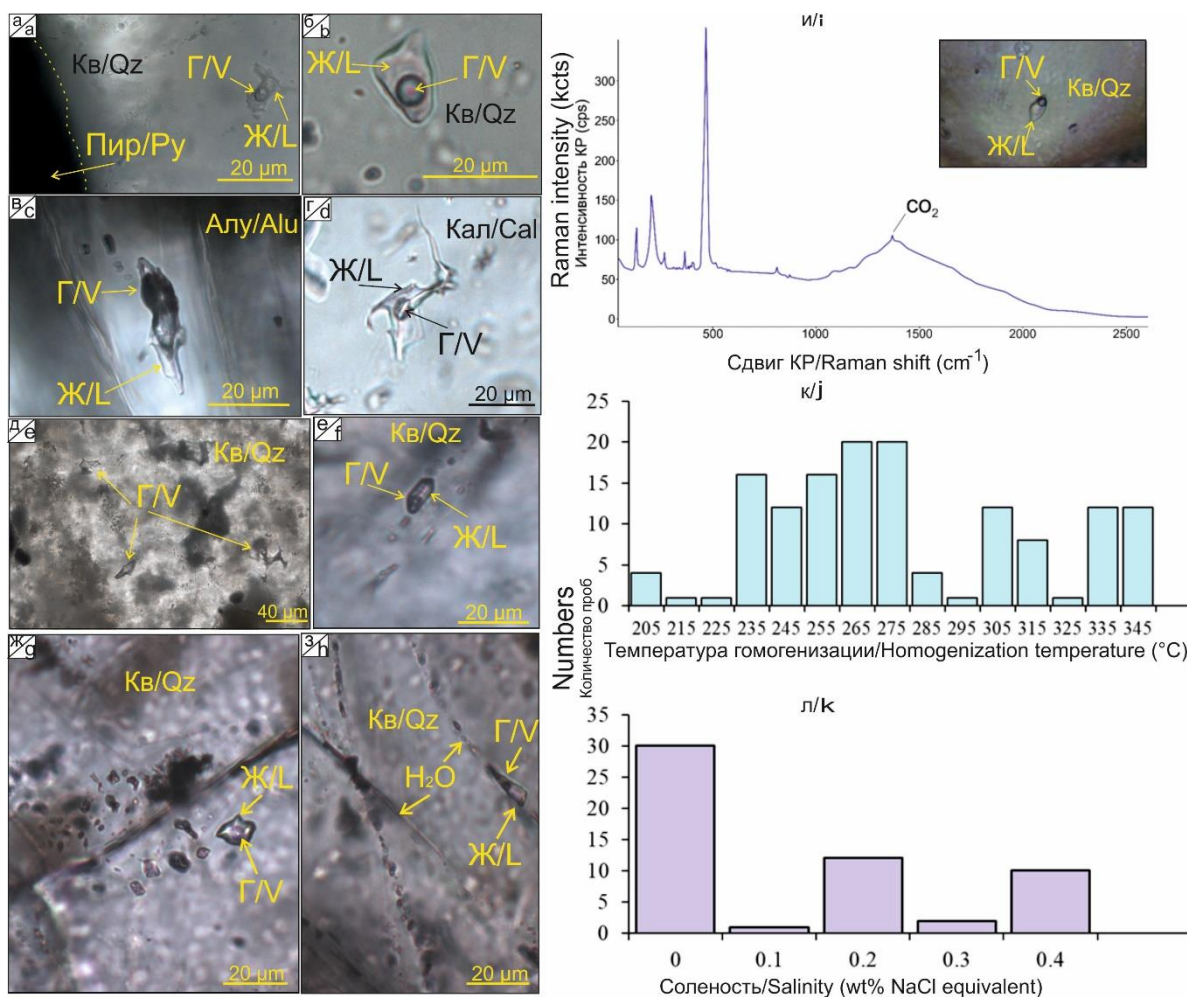
Рис. 5. Микрофотографии в проходящем (а, с, е, г, и) и отраженном (б, д, ж, и) свете текстурных особенностей жильного кварца (Кв): кристификационная (а–в); колломорфная (с); мозаичная (д, е); перистая (ж–к)

Fig. 5. Transmitted-light photomicrographs in plane- (a, d, f, h, j) and cross-polarized (b, c, e, g, i) light of vein quartz (Qz) textures: crustified (a–c); collomorphic (d); mosaic (e, f); feathery (g–j)

#### Тип эпитермального оруденения

Околорудный метасоматизм играет важную роль при установлении того или иного типа эпитермальных месторождений золота. Распространение вторичных кварцитов (с преобладанием остаточного кавернозного кварца) и аргиллизитов (с преобладанием

алуниита, диккита и пиррофиллита) обычно характеризует «литокапы (lithocaps)», связанные с кислотно-сульфатными (HS) и умеренно-кислотными эпитермальными месторождениями (IS) [1, 2, 5, 10, 22–24]. Присутствие карбонатов в наименее измененных породах участка Эми является одним из свидетельств умеренно-кислотного режима (IS) [5, 25–28].



**Рис. 6.** Микрофотографии первичных газовой(Г)-жидких(Ж) (а–д) и газовых(Г) (д) включений, захваченных в кварце (Кв) (а, б), алуните (Алу) (в), кальците (Кал) (г) и вторичных газовой-жидких (е–з) и жидких (з) включениях, представленных водой (H<sub>2</sub>O), изученных в пределах рудного поля Светлое; (и) рамановский спектр, соответствующий углекислому газу, отражающий состав газа вторичных газовой-жидких включений в кварце (Кв) (м. Елена). Суммарные диаграммы температур гомогенизации (к) и солености (л), полученные по включения рудного поля Светлое

**Fig. 6.** Microphotographs of primary vapor(V)-liquid(L) (a–d) and vapor(V) fluid inclusions hosted in quartz (Qz) (a, b), alunite (Alu) (c) and calcite (Cal) (d), and secondary vapor-liquid (f–h) and liquid (h) inclusions, represented by water (H<sub>2</sub>O), observed within the SED; Raman spectra of dioxide carbon reflecting gas composition of the secondary two-phase liquid and vapor rich inclusion (i) in quartz (d. Elena); summary histograms of (j) homogenization temperatures and (k) salinity for inclusions of the SED

Учитывая тот факт, что в пределах участка Елена широко развиты алунитовые и диккитовые кварциты, этот участок по набору метасоматически-измененных пород соответствует кислотно-сульфатному (HS) типу. При этом участок Эми характеризует небольшое количество алунитовых кварцитов и преобладание вторичных кварцитов и аргиллизитов (рис. 2, Б), где широко распространены такие филлосиликаты, как серицит и иллит, что наиболее характерно для промежуточного умеренно-кислотного эпитеермального (IS) типа. Преобладающими текстурами кварца являются колломорфная, мозаичная, крустификационная и перистая (эвгдральный кварц), характерные для HS-IS типов.

Типы эпитеермальных месторождений идентифицируются не только на основе состава метасоматически-измененных пород, но и главным образом на ос-

нове вещественного состава гипогенной сульфидной ассоциации [8].

Состав гипогенных сульфидов представлен главным образом сульфидами полиметаллов и теннантит-тетраэдритом, при этом типичные сульфиды, отвечающие кислотно-сульфатному (HS) типу, такие как энаргит, люционит, фаматинит, гипогенный ковеллин, установлены не были. Однако можно с определенной долей уверенности предположить, что (HS) гипогенные сульфиды могли быть эродированы на меньшей глубине или изменены до блеклых руд на современном уровне эрозионного среза в пределах участка Эми аналогично эпитеермальному рудному полю Саммитвиля (Колорадо) [29, 30] и согласно существующим представлениям о эпитеермальных системах в целом [21]. Содержание гипогенной сульфидной ассоциации в рудоносных жилах и прожилках

участка Эми более 5 %, что, согласно данным [27], характерный признак месторождений IS типа. По данным Ли Ванга [28] месторождения умеренно-кислотного типа зачастую имеют тесную связь с андезитом-дацитовыми вулканогенно-субвулканическими породами, образованными в субдукционных обстановках на глубинах от 300...1000 м как результат известково-щелочного магматизма. Температуры гомогенизации газовой-жидких включений варьируют в пределах от 150 до 350 °С аналогично полученным нами данным при проведении микрокриотермометрических экспериментов.

Таким образом, по особенностям проявления метасоматической зональности, ассоциации жильных минералов, вещественному составу гипогенных сульфидов и флюидному режиму эпitherмальное золоторудное поле Светлое относится к «кислотно-умеренно-кислотному сульфатному типу (HS-IS)» [31–33] аналогично Малетойвямскому полю центральной Камчатки [34–36], а также другим зарубежным аналогам, таким как месторождения Виктория-Лепанто (Филлиппинские острова) [37]; Ресковское рудное поле (Венгрия) [38]; Перама-Хилл (Греция) [39]; Зиншиан (Китай) [40, 41], Мах-Ад-Дахаб (Саудовская Аравия) [42], Зехабад (Иран) [43].

В определенных случаях с месторождениями HS-IS типа генетически связаны порфировые месторождения, которые являются корневыми частями единой гидротермальной системы [37–40].

#### Выводы

Зональность проявления гидротермальных изменений в пределах эпitherмального рудного поля Светлое имеет следующие основные особенности:

1. Схема метасоматической зональности эпitherмального рудного поля Светлое представлена следующей сменой метасоматитов от центральной

зоны к периферии: монокварциты → алунитовые кварциты → диккитовые кварциты → кварц-гидрослюдистые аргиллизиты → пропилиты.

2. Жильный кварц представлен четырьмя текстурными разновидностями – крустификационный, мозаичный, перистый (эвгедральный), колломорфный. Установленная микрозональность кварца (колломорфный → мозаичный → перистый) отражает многоактное (или пульсационное) поступление флюидов.
3. В пределах залежи вторичных кварцитов отмечается приуроченность колломорфного и перистого кварца к пористым и, реже, массивным монокварцитам. Мозаичный и крустификационный кварц встречаются во всех типах вторичных кварцитов.
4. Состав гипогенной сульфидной минерализации представлен сульфидами полиметаллов Cu, Pb, Zn, Fe в виде пирита, галенита, сфалерита, халькопирита и теннантит-тетраэдрита. В пределах участка Эми минеральная ассоциация сульфидов гидротермальной стадии составляет более 5 об. % и отличается разнообразием и обилием теллуридов.
5. Золотое оруденение представлено двумя типами: Au-Ag и Au-Ag-теллуридным. Au-Ag руды представлены первичными рудами со средней пробой ~900 ‰, развитыми в пределах участка Эми, вторичные (окисленные) руды с пробой до 1000‰ преобладают на участке Елена.
6. По вещественному составу измененных пород, гипогенной сульфидной ассоциации и флюидному режиму эпitherмальное поле Светлое относится к сульфатно- и умеренно-кислотному (HS-IS) типу, для которого характерна перспектива обнаружения порфирового оруденения на глубину.

*Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindgren W. Mineral deposits. – New York; London: McGraw-Hill Book Company, 1933. – 930 p.
2. White D.E. Thermal springs and epithermal ore deposits // *Economic Geology*. – 1955. – V. 55. – P. 99–154.
3. Henley R.W. Epithermal deposits in volcanic terranes // *Gold Metallogeny and Exploration*. – Glasgow: Blackie, 1991. – P. 133–164.
4. Sillitoe R.H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features // *Mineral Deposits Division, Special Paper*. – Saint John's: Geological Association of Canada, 1993. – P. 403–417.
5. White N.C., Hedenquist J.W., Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration // *SEG Newsletter*. – 1995. – V. 23. – P. 1–9.
6. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration / J.W. Hedenquist, E. Izawa, A. Arribas, N.C. White // *Resource Geology*. – 1996. – V. 1. – P. 1–15.
7. Hedenquist J.W., Arribas R.A. Exploration for epithermal gold deposits // *Reviews in Economic Geology*. – 2000. – V. 13. – P. 245–277.
8. Sillitoe R., Hedenquist J. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits // *Society of Economic Geologists Special Public.* – 2003. – V. 10. – P. 315–343.
9. Taylor B.E. Epithermal gold deposits // *Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods /*

Ed. by W.D. Goodfellow. Mineral Deposits Division, Special Publication. – Saint John's, NL, Canada: Geological Association of Canada, 2007. – V. 5. – P. 113–139.

10. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines / Z. Chang, J.W. Hedenquist, N.C. White, D.R. Cooke, M. Roach, C.L. Deyell, J.Jr. Garcia, J.B. Gemmill, S. McKnight, A.L. Cuisson // *Economic Geology* – 2011. – V. 106. – P. 1365–1398.
11. Lithocaps – characteristics, origins and significance for porphyry and epithermal exploration / D.R. Cooke, N.C. White, L. Zhang, Z. Chang, H. Chen // *Mineral Resources to Discovery – 14 th SGA Biennial Meeting*. – Quebec City, Canada, 2017. – V. 1. – P. 291–294.
12. Кигаи И.Н. Условия формирования метасоматитов и оруденения эпitherмальных золото-серебряных месторождений // *Геология рудных месторождений*. – 2020. – V. 62. – № 5. – P. 475–480.
13. Cherkasova (Yakich) T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymetallic zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27: *Problems of Geology and Subsurface Development*. – P. 1–5.
14. 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: *Problems of Geology and Subsurface Development*. – P. 1–6.

15. The Okhotsk-Chukotka volcanic belt: age of its northern part according to new Ar-Ar and U-Pb geochronological data / P.L. Tikhomirov, V.V. Akinin, V.O. Ispolatov, P. Alexander, I.Y. Cherepanova, V.V. Zagoskin // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2006. – V. 14. – P. 524–537.
16. Late Mesozoic silicic magmatism of the North Chukotka area (NE Russia): age, magma sources, and geodynamic implications / P.L. Tikhomirov, E.A. Kalinina, K. Kobayashi, E. Nakamura // *Lithos*. – 2008. – V. 105. – P. 329–346.
17. Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Поцелуев А.А. Дистанционная прогнозно-поисковая модель эпitherмальных Au-Ag месторождений (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 84–92.
18. Мишин Л.Ф. Вторичные кварциты и их связь с золоторудной минерализацией месторождения Светлое (Россия) (Ульинский прогиб, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // *Тихоокеанская геология*. – 2011. – Т. 30. – № 4. – С. 32–48.
19. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. – Владивосток: Даль-наука, 2006. – 981 с.
20. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: application to exploration / D. Moncada, S. Mutchler, A. Nieto, T.J. Reynolds, J.D. Rimstidt, R.J. Bodnar // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2012. – V. 114. – P. 20–35.
21. Hedenquist J.W., Taran Y.A. Modeling the formation of advanced argillic lithocaps: Volcanic vapor condensation above porphyry intrusions // *Economic Geology*. – 2013. – V. 108. – P. 1523–1540.
22. Sillitoe R.H. Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism // *Geological Society Special Publication*. – 1977. – V. 7 (1) – P. 99–116.
23. Sillitoe R.H. Epithermal models; genetic types, geometrical controls and shallow features // *Special Papers*. – Saint John's: The Geological Association of Canada, 1993. – P. 403–417.
24. Hedenquist J.W., Henley R.W. The importance of CO<sub>2</sub> on freezing point measurements of fluid: evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition // *Economic Geology*. – 1985. – V. 80. – P. 1379–1406.
25. Heald P., Foley N.K., Hayba D.O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid- sulfate and adularia-sericitic types // *Economic Geology*. – 1987. – V. 82. – P. 1–26.
26. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration / J.W. Hedenquist, E. Izawa, A. Arribas, N.C. White // *Publications Society of Economic Geologists News*. – 1995. – V. 1. – P. 9–13.
27. Basic characteristics and research progresses of intermediate sulfidation type epithermal gold polymetallic Deposits and prospects / G.X. Song, K.Z. Qin, G.M. Li, L. Wang // *Acta Petrologica Sinica*. – 2018. – V. 34. – P. 748–762.
28. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification / L. Wang, K.Z. Qin, G.X. Song, G.M. Li // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 107. – P. 434–456.
29. Steven T.A., Ratte J.C. Geology and ore deposits of the Summitville District, San Juan Mountains, Colorado. United States Geological Survey Professional Paper. – Washington, NL, Canada: Geological Association of Canada, 1960. – V. 343. – 70 p.
30. Stoffregen R. Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado // *Economic Geology*. – 1987. – V. 82. – P. 1575–1591.
31. Sillitoe R.H. Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralization in porphyry and epithermal environments // *AusIMM Proceedings* 306. – Bali: Indonesia, 1999. – P. 19–34.
32. Arribas A. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid // *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*. – 1995. – V. 23. – P. 419–454.
33. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration / T.Yu. Yakich, Y.S. Ananyev, A.S. Ruban, R.Y. Gavrillov, D.V. Lesnyak, D.V. Levochskaia, O.V. Savinova, M.A. Rudmin // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V. 136. – 104257.
34. Au(Ag)-Se-Te-S-Cu-Sb-As-Bi mineralization at the Maletoyvayam deposit (Central Kamchatka, Russia) and physicochemical conditions of its formation / E.G. Sidorov, A.A. Borovikov, N.D. Tolstykh, D.S. Bukhanova, G.A. Palyanova, V.M. Chubarov // *Minerals*. – 2020. – V. 10. – P. 1–19.
35. Shapovalova M., Tolstykh N., Bobrova O. Chemical composition and varieties of sulfosalts from gold mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletoyvayam ore field) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 319. – P. 7–16.
36. Mustard gold of the gaching ore deposit (Maletoyvayam ore field, Kamchatka, Russia) / N.D. Tolstykh, G.A. Palyanova, O.V. Bobrova, E.G. Sidorov // *Minerals*. – 2019. – V. 9. – P. 1–18.
37. Claveria R.J.R. Mineral paragenesis of the Lepanto copper and gold and the Victoria gold deposits, Mankayan Mineral District, Philippines // *Resource Geology*. – 2001. – V. 51. – P. 97–106.
38. Ore mineralogy and fluid inclusion constraints on the temporal and spatial evolution of a high-sulfidation epithermal Cu-Au-Ag deposit in the Reck ore complex, Hungary / A. Takács, F. Molnár, J. Turi, A. Mogessie, J.C. Menzies // *Economic Geology*. – 2017. – V. 112. – P. 1461–1481.
39. Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrola Graben, NE Greece / P.C. Voudouris, V. Melfos, P.G. Spry, R. Moritz, C. Papavassiliou, G. Falalakis // *Mineralogy and Petrology*. – 2011. – V. 103. – P. 79–100.
40. Geology and fluid inclusion geochemistry of the Zijinshan high-sulfidation epithermal Cu-Au deposit, Fujian Province, SE China: implication for deep exploration targeting / J. Zhong, Y.-J. Chen, J. Chen, J.-P. Qi, M.-C. Dai // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – V. 184. – P. 49–65.
41. Spatial distribution and variation of ore body, alteration and ore-forming fluid of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au deposit, SE China: implication for mineral exploration / J.-Y. Pan, P. Ni, Z. Chi, Y.-L. Yang, S.-N. Li, T. Bao, W.-B. Wang, W. Zeng, K. Xue // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2018. – V. 18. – P. 279–293.
42. Geology, mineralogy and genesis of the world-class Mahd Adh Dhahab epithermal Au-(Ag)-telluride deposit, Kingdom of Saudi Arabia / S.A. El-shafei, K.M. Abdel-Maksoud, H.M. Helmy, A.H. Ahmed // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2020. – V. 201. – 104510.
43. Shabazi S., Ghaderi M., Alfonso P. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit, NW Iran // *Turkish Journal of Earth Sciences*. – 2019. – V. 28. – P. 882–901.

Поступила 25.08.2021 г.

#### Информация об авторах

**Левочская Д.В.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; начальник отдела поисковых работ Хабаровского филиала АО «Полиметалл УК».

**Якич Т.Ю.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Лесняк Д.В.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; начальник управления минерально-сырьевых ресурсов Хабаровского филиала АО «Полиметалл УК».

**Ананьев Ю.С.**, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.113

## HYDROTHERMAL-ALTERED ZONING, FLUID CONDITIONS, AND TYPES OF GOLD MINERALIZATION WITHIN THE ELENA AND EMMY DEPOSITS OF THE EPITHERMAL SVETLOE ORE DISTRICT (KHABAROVSK TERRITORY)

**Darya V. Levochskaya**<sup>1,2</sup>,  
levochskayaDV@polymetal.ru

**Tamara Yu. Yakich**<sup>1</sup>,  
cherkasovatu@tpu.ru

**Dmitry V. Lesnyak**<sup>1,2</sup>,  
lesnyakdv@polymetal.ru

**Yuriy S. Ananiev**<sup>1</sup>,  
AnanyevYS@tpu.ru

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

<sup>2</sup> JSC Polymetal Management, Khabarovsk branch,  
18, Muravev-Amursky street, Khabarovsk, 680000, Russia.

**The relevance** of the study is determined by obtaining new data concerning mineral composition, textural and structural features, hydrothermal-metasomatic zoning, fluid regime, and types of gold mineralization of two most contrasting areas of the Svetloe epithermal district (Khabarovsk Territory), formed in different-aged parent rocks of the Late Cretaceous age ( $K_2$ ) of the Khetanian Formation basic composition in the Cognac-Santonian Stage (d. Emmy) and discordant bedding felsic rocks of the Urak Formation of the Campanian-Maastrichtian Stage (d. Elena). The selected objects are characterized by different levels of zone erosion and most fully reflect the diversity of altered rocks of the Svetloe epithermal district. Altered rock represented by weakly altered rocks of the Khetanian Formation within the Emmy deposit and strongly altered, including hypogene processes, acidic rocks prevailing on the territory of the Elena deposit. The data obtained play an important role in establishing the type of epithermal deposits, forecasting mineralization at depth, and can also be used to identify search criteria and features of similar objects both in the Okhotsk-Chukotka volcanic belt and beyond. The **aim** of this work is to study the hydrothermal-metasomatic zoning, material composition, textural and structural features, fluid regime, as well as the forms of gold occurrence in the Svetloe epithermal ore district using the Emmy and Elena deposits as example. The **objects** of the study are ores, metasomatites and weakly altered parental rocks in the form of core, ore and chipped samples taken as a result of research work from eight wells and two operating open pits. The rocks were studied by optical and electron microscopy **methods** using energy dispersive spectroscopy, as well as by X-ray diffraction analysis, microthermometry, and Raman spectrometry. As a **result** of the studies, it has been established that the altered zoning of the Svetloe epithermal district includes an axial zone of residual quartz with various texture and structural features – mosaic, feathered, collomorphic, and crustifying structure and a halo of interbedded linearly elongated zones of altered rocks composed of alunite-and dickite-quartz zone, which are replaced at more distance from the axial zone by sericite and illite-chlorite zones of the propylite formation, with a lesser degree of elaboration of volcanic and volcanic-clastic rocks of the acid composition of the Urak Formation, the ore-containing area of the Elena, and of intermediate and basic composition including the Emmy deposit. The main part of mineralization is associated with the residual quartz zone. The morphology of ore bodies is represented by sub-layer linear keeled deposits with mushroom-like swells in paleo-grooves up to 110 m. The average thickness of ore bodies varies from 12 to 60 m, up to 700 m long, and 100...240 m wide. The fall of the ore zones is gentle, steep near the paleo-grooves with uneven or very uneven distribution of the valuable component. The average grade of gold in ores is 2,5 g/t. The composition of hypogene sulfide mineralization is represented by sulfides of polymetals Cu, Pb, Zn, Fe in the mineral form of pyrite, galena, sphalerite, chalcocopyrite, and tennantite-tetrahedrite. Within the ore bodies of the Emmy deposit, the mineral association of sulfides of the hydrothermal stage is more than 5 vol. % and distinguished by the diversity and abundance of tellurides. Gold mineralization is represented by two types: Au-Ag and Au-Ag-telluride. Au-Ag ores are represented by primary ores with an average fineness of ~900 ‰ developed within the Emmy deposit and secondary (oxidized) ores with a fineness of up to 1000 ‰ prevailing at the Elena deposit. According to the results of the study of vapor-liquid inclusions in quartz, the hydrothermal-ore process at the Emmy deposit proceeded at 260...330 °C. Microcryothermometric experiments of the Elena deposit indicate the 200...240 °C range of the hydrothermal process. In terms of the material composition of altered rocks, hypogene sulfide association, and fluid regime, the Svetloe epithermal district belongs to the sulfate-acid and medium-acid (HS-IS) type, showing the prospect of detecting porphyry mineralization at depth.

### Key words:

Hydrothermal-altered zoning, epithermal gold deposits, textural and structural features, fluid conditions, Svetloe epithermal ore district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt.

*The research was carried out within the TPU Competitiveness Enhancement Program.*

### REFERENCES

1. Lindgren W. *Mineral deposits*. New York, London, McGraw-Hill Book Company, 1933. 930 p.
2. White D.E. Thermal springs and epithermal ore deposits. *Economic Geology*, 1955, vol. 55, pp. 99–154.
3. Henley R.W. Epithermal deposits in volcanic terranes. *Gold Metallogeny and Exploration*. Glasgow, Blackie, 1991. pp. 133–164.

4. Sillitoe R.H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features. *Special Paper*. Saint John's, Geological Association of Canada, 1993. pp. 403–417.
5. White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, 1995, vol. 1, pp. 9–13.
6. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White, N.C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Resource Geology*, 1996, vol. 1, pp. 9–13.
7. Hedenquist J.W., Arribas R.A. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 245–277.
8. Sillitoe R., Hedenquist J. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists Special Public*, 2003, vol. 10, pp. 315–343.
9. Taylor B.E. Epithermal gold deposits. *Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Ed. by W.D. Goodfellow. Mineral Deposits Division, Special Publication; Saint John, NL, Canada, Geological Association of Canada, 2007. Vol. 5, pp. 113–139.
10. Chang Z., Hedenquist J.W., White N.C., Cooke D.R., Roach M., Deyell C.L., Garcia J., Jr., Gemmill J.B., McKnight S., Cuisson A.L. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, pp. 1365–1398.
11. Cooke D.R., White N.C., Zhang L., Chang Z., Chen H., Lithocaps – characteristics, origins and significance for porphyry and epithermal exploration. *Mineral Resources to Discovery – 14th SGA Biennial Meeting*. Quebec City, Canada, 2017. Vol. 1, pp. 291–294.
12. Kigay I.N. Conditions for the formation of metasomatites and mineralization of epithermal gold-silver deposits. *Geology of Ore Deposits*, 2020, vol. 62, Iss. 5, pp. 475–480. In Rus.
13. Cherkasova (Yakich) T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polyminer zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. *Problems of Geology and Subsurface Development*. pp. 1–5.
14. Timkin T., Voroshilov V., Askanakova O., Cherkasova (Yakich) 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. *Problems of Geology and Subsurface Development*. pp. 1–6.
15. Tikhomirov P.L., Akinin V. V., Ispolatov V.O., Alexander P., Cherepanova I.Y., Zagoskin V.V. The Okhotsk-Chukotka volcanic belt: age of its northern part according to new Ar-Ar and U-Pb geochronological data. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2006, vol. 14, pp. 524–537.
16. Tikhomirov P.L., Kalinina E.A., Kobayashi K., Nakamura E. Late Mesozoic silicic magmatism and metallogeny of the North Chukotka area (NE Russia): age, magma sources, and geodynamic implications. *Lithos*, 2008, vol. 105, pp. 329–346.
17. Ananyev Y.S., Zhitkov V.G., Potseluev A.A. Forecasting and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits using modern satellite data (on the example of ore field svetloe, Khabarovskiy kray). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 84–92. In Rus.
18. Mishin L.F. Secondary quartzites and their relation to gold ore mineralization of the Svetloye deposit (Ulya trough, Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt). *Russian journal of pacific geology*, 2011, vol. 30, pp. 32–48. In Rus.
19. *Geodinamika, magmatism i metallogeniya Vostoka Rossii* [Geodynamics, magmatism, and metallogeny of the Russian East]. Ed. by A.I. Khanchuk. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2006. 981 p.
20. Moncada D., Mutchler S., Nieto A., Reynolds T.J., Rimstidt J.D., Bodnar R.J. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, vol. 114, pp. 20–35.
21. Hedenquist J.W., Taran Y.A., Modeling the formation of advanced argillic lithocaps: Volcanic vapor condensation above porphyry intrusions. *Economic Geology*, 2013, vol. 108, pp. 1523–1540.
22. Sillitoe R.H. Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism. *Geological Society Special Publication*, 1977, vol. 7 (1), pp. 99–116.
23. Sillitoe R.H. Epithermal models; genetic types, geometrical controls and shallow features. *Special Papers*. Saint John's, The Geological Association of Canada, 1993. pp. 403–417.
24. Hedenquist J.W., Henley R.W. The importance of CO<sub>2</sub> on freezing point measurements of fluid: evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition. *Economic Geology*, 1985, vol. 80, pp. 1379–1406.
25. Heald P., Foley N.K., Hayba D.O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid- sulfate and adularia-sericite types. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, pp. 1–26.
26. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White N.C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Publications Society of Economic Geologists News*, 1995, vol. 1, pp. 9–13.
27. Song G.X., Qin K.Z., Li G.M., Wang L. Basic characteristics and research progresses of intermediate sulfidation type epithermal gold polymetallic deposits and prospects. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, vol. 34, pp. 748–762.
28. Wang L., Qin K.Z., Song G.X., Li G. M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 107, pp. 434–456.
29. Steven T.A., Ratte J.C. Geology and ore deposits of the Summitville District, San Juan Mountains, Colorado. *United States Geological Survey Professional Paper. 343*, Washington, NL, Canada, Geological Association of Canada, 1960. 70 p.
30. Stoffregen R. Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, pp. 1575–1591.
31. Sillitoe R.H. *Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralization in porphyry and epithermal environments* [AusIMM Proceedings 306]. Bali, Indonesia, 1999. pp. 19–34.
32. Arribas A. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 1995, vol. 23, pp. 419–454.
33. Yakich T.Y., Ananyev Y.S., Ruban A.S., Gavrilov R.Y., Lesnyak D.V., Levochskaia 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.
34. Sidorov E.G., Borovikov A.A., Tolstykh N.D., Bukhanova D.S., Palyanova G.A., Chubarov V.M. Au(Ag)-Se-Te-S-Cu-Sb-As-Bi mineralization at the Maletoyvayam deposit (Central Kamchatka, Russia) and physicochemical conditions of its formation. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 1–19.
35. Shapovalova M., Tolstykh N., Bobrova O. Chemical composition and varieties of sulfosalts from gold mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletoyvayam ore field). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 319, pp. 7–16.
36. Tolstykh N.D., Palyanova G.A., Bobrova O. V., Sidorov E.G. Mustard gold of the gaching ore deposit (Maletoyvayam ore field, Kamchatka, Russia). *Minerals*, 2019, vol. 9, pp. 1–18.
37. Claveria R.J.R. Mineral paragenesis of the Lepanto copper and gold and the Victoria gold deposits, Mankayan Mineral District, Philippines. *Resource Geology*, 2001, vol. 51, pp. 97–106.
38. Takács Á., Molnár F., Turi J., Mogessie A., Menzies J.C. Ore mineralogy and fluid inclusion constraints on the temporal and spatial evolution of a high-sulfidation epithermal Cu-Au-Ag deposit in the Recks ore complex, Hungary. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, pp. 1461–1481.
39. Voudouris P.C., Melfos V., Spry P.G., Moritz R., Papavassiliou C., Falalakis G. Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrota Graben, NE Greece. *Mineralogy and Petrology*, 2011, vol. 103, pp. 79–100.
40. Zhong J., Chen Y.-J., Chen J., Qi J.-P., Dai M.-C. Geology and fluid inclusion geochemistry of the Zijinshan high-sulfidation epithermal Cu-Au deposit, Fujian Province, SE China: implication for deep exploration targeting. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, vol. 184, pp. 49–65.
41. Pan J.-Y., Ni P., Chi Z., Yang Y.-L., Li S.-N., Bao T., Wang W.-B., Zeng W., Xue K. Spatial distribution and variation of ore body, alteration and ore-forming fluid of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au deposit, SE China: implication for mineral exploration.

- Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2018, vol. 18, pp. 279–293.
42. El-shafei S.A., Abdel-Maksoud K.M., Helmy H.M., Ahmed A.H. Geology, mineralogy and genesis of the world-class Mahd Adh Dhahab epithermal Au-(Ag)-telluride deposit, Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, vol. 201, 104510.
43. Shahbazi S., Ghaderi M., Alfonso P. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit, NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2019, vol. 28, pp. 882–901.

*Received: 25 August 2021.*

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

**Darya V. Levochskaya**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; head of prospecting geological works department, JSC Polymetal Management, Khabarovsk branch.

**Tamara Yu. Yakich**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry V. Lesnyak**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; head of Mineral resources department, JSC Polymetal Management, Khabarovsk branch.

**Yuriy S. Ananiev**, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.



УДК 504.3.054

## МОНИТОРИНГ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СЫКТЫВКАРСКОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

**Василевич Мария Ивановна<sup>1</sup>,**  
mvasilevich@ib.komisc.ru

**Кондратёнок Борис Михайлович<sup>1</sup>,**  
kondratenok@ib.komisc.ru

**Очеретенко Дмитрий Петрович<sup>2</sup>,**  
dmitry.ocheretenko@mondigroup.com

**Василевич Роман Сергеевич<sup>1</sup>,**  
vasilevich.r.s@ib.komisc.ru

**Габов Дмитрий Николаевич<sup>1</sup>,**  
gabov@ib.komisc.ru

**Лодыгин Евгений Дмитриевич<sup>1</sup>,**  
lodigin@ib.komisc.ru

<sup>1</sup> Институт Биологии ФИЦ КомиНЦ УрО РАН,  
Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28.

<sup>2</sup> АО «Монди СЛПК»,  
Россия, 167026, Сыктывкар, пр. Бумажников, 2.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью оценки уровня воздействия крупного целлюлозно-бумажного предприятия, расположенного к северу от г. Сыктывкара, на основе экохимического анализа зимних атмосферных осадков (снега), продемонстрировать целесообразность применения такого подхода в экологических исследованиях.

**Цель:** показать динамику аэротехногенной нагрузки на территорию вблизи АО «Монди СЛПК» по данным о химическом составе снежного покрова за период мониторинга.

**Объекты:** образцы снежного покрова, отобранные в зоне воздействия предприятия и на условно фоновых территориях.

**Методы:** снежосъемка с использованием трансект на постоянных пунктах отбора проб, применение аналитических методов согласно руководству по контролю загрязнения атмосферы (РД 52.04.186-89), картографические методы оценки распространения загрязнения в снежном покрове с использованием метода интерполяции (метод обратных взвешенных расстояний), применение алгебры карт для расчета площадей зон воздействия.

**Результаты.** Представлены результаты экохимического мониторинга снежного покрова в зоне воздействия выбросов АО «Монди СЛПК» за многолетний период. Дана общая характеристика распределения компонентов выбросов относительно источника эмиссии. Мониторинг снежного покрова в импактной зоне предприятия позволил провести анализ динамики аэротехногенной нагрузки. Результаты расчета поступления веществ на территорию предприятия в 2019 г. показали наиболее низкий уровень загрязнения снежного покрова за весь период наблюдений, 66 % относительно объемов 2002 г. Отмечено снижение поступления загрязнителей, начиная с 2016 г. после реконструкции предприятия. Концентрации примесей в талой воде за пределами санитарно-защитной зоны не превышали санитарно-гигиенических нормативов. По данным мониторинга снежного покрова показан тренд к снижению аэрогенного воздействия.

### **Ключевые слова:**

Снежный покров, экохимический мониторинг, целлюлозно-бумажное предприятие, динамика и зоны воздействия

### **Введение**

При проведении экохимического мониторинга важным является выбор природных объектов для исследования. Качество атмосферного воздуха длительное время изучается посредством исследования химического состава атмосферных осадков. Химический состав атмосферных осадков широко используют для оценки загрязненности атмосферы, т. к. концентрация химических веществ в атмосферных осадках коррелирует с их концентрацией в воздухе [1, 2]. Снежный покров способен сохранять и накапливать вещества, поступающие на его поверхность из атмосферы, что позволяет проводить интегральные оцен-

ки загрязненности территорий за длительные временные периоды [3]. Анализ научных публикаций по геоэкологическим исследованиям урбанизированных территорий свидетельствует о том, что загрязненность снежного покрова отражает степень антропогенного воздействия на окружающую среду [4, 5]. Поэтому химический состав снежного покрова находит широкое применение в мониторинговых исследованиях аэрогенного воздействия промышленных предприятий на окружающую среду [6–11].

Современные картографические методы обработки данных [12] позволяют по результатам количественного химического анализа проб снежного по-

крова установить закономерности распределения загрязнителей, входящих в состав газопылевых выбросов, выявить источники загрязнения и ареалы их влияния, дифференцировать территорию по уровню техногенного воздействия, оценить количество токсикантов, выносимое талыми водами в поверхностные водоемы и мигрирующее в почвы и подземные воды [13].

Исследования были проведены на территории, расположенной в зоне аэротехногенного воздействия АО «Монди СЛПК» (СЛПК) – одного из крупнейших предприятий целлюлозно-бумажного производства в европейской части России. С 2002–2003 гг. на предприятии начались работы по изменению технологических процессов и модернизации очистных сооружений с целью снижения воздействия на окружающую среду. За 2004–2006 гг. произошло снижение выбросов в атмосферу по взвешенным веществам за счет установки электрофильтра, а также, в связи с переходом на бесхлорную отбелку, исключено применение элементарного хлора. В 2008 г. на предприятии была начата программа по модернизации «STEP». Построен новый сордерегенерационный котел, система сбора *дурнопахнущих* газов от производства целлюлозы, установлен электрофильтр на регенерационную печь, известерегенерационная печь № 3 переведена на обжиг извести. Также проведены другие работы по модернизации, которые продолжают до настоящего времени. Все эти мероприятия к настоящему времени позволили снизить выбросы в атмосферу взвешенных веществ, *дурнопахнущих* газов, серосодержащих веществ, оксида углерода, а также хлора и двуокиси хлора.

Таким образом, улучшились многие показатели по воздуху и стали значительно ниже допустимых нормативов. В связи с этим было целесообразно провести анализ изменения динамики загрязнения по показателям химического состава снежного покрова в зоне эмиссии.

Мониторинг химического состава снежного покрова на территории промышленной площадки СЛПК и прилегающих территориях проводили в 2002–2007, 2016, 2018 и 2019 гг. Цель настоящей работы показать динамику аэротехногенной нагрузки на территорию вблизи СЛПК по данным о химическом составе снежного покрова за весь период мониторинга.

#### Объекты и методы

Территория исследования расположена в орографической области Вычегодско-Мезенской равнины, в юго-западной части Республики Коми на левом берегу реки Вычегды, в 18 км на север от г. Сыктывкара, в Эжвинском районе города. Климат местности умеренно континентальный, с непродолжительным, но достаточно теплым летом и с многоснежной, продолжительной и умеренно-холодной зимой. Годовое суммарное выпадение осадков составляет 560 мм. Преобладающее направление ветра для данной местности – юго-западное и южное [14].

Отбор проб снега проводили непосредственно на территории СЛПК, на границе санитарно-защитной

зоны (СЗЗ), а также на участках, расположенных в соответствии с характерной для данной местности «розы ветров» с преобладанием в зимнее время ветров южного и юго-западного направлений. Отбор проб снега осуществляли в период максимального снегонакопления и до начала снеготаяния – в I и II декадах марта. Отбор проб снежного покрова проводили на постоянных ключевых пунктах наблюдения с незначительным варьированием расположения точек отбора проб (рис. 1).

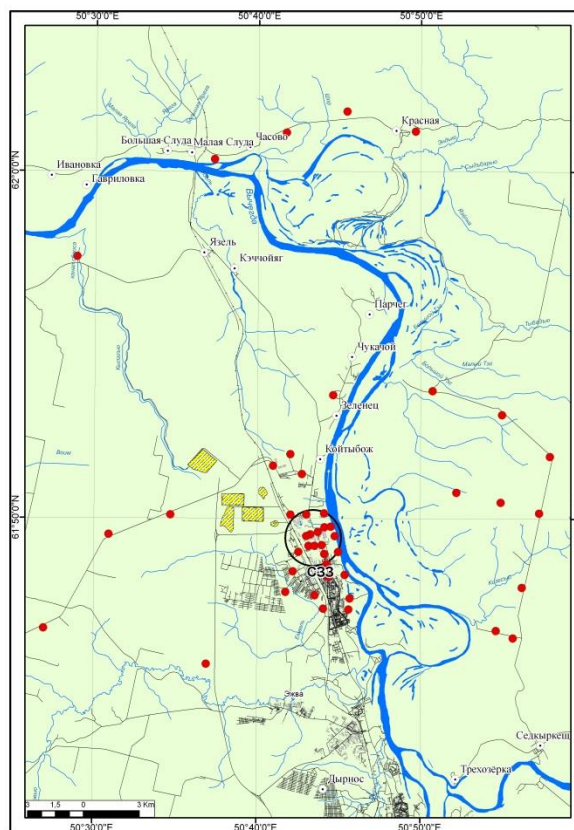


Рис. 1. Схема отбора образцов снежного покрова в 2019 г.  
Fig. 1. Snow cover sampling scheme in 2019

Всего за весь период мониторинга было отобрано 446 проб снежного покрова, в среднем за сезон – около 50 проб.

Отбор проб проводили пластиковой трубкой, на внешней поверхности которой были нанесены деления для замера высоты снежного покрова. В намеченных точках пробоотбора с площади 8–10 м<sup>2</sup> отбирали смешанную пробу – 5–20 снежных кернов в один общий для данной точки полиэтиленовый пакет, предварительно промытый бидистиллированной водой. Во избежание загрязнения проб снежного покрова частицами почвы нижнюю часть кернов (1–2 см) отбрасывали. Пробы снежного покрова взвешивали с точностью 0,005 кг и хранили до проведения анализа в твердом состоянии при температуре минус 30 °С. Масса отдельной пробы с каждого участка отбора составляла от 3 до 3,5 кг.

На первом этапе пробоподготовки образцы снега растапливали при комнатной температуре в тщатель-

но промытых бидистиллятом пластиковых емкостях. В нефильтрованных пробах был проведен анализ водородного показателя (рН), удельной электропроводности, химического потребления кислорода (ХПК). После стабилизации температуры талых вод на уровне комнатной пробы фильтровали через мембранные ацетат-целлюлозные фильтры Владипор ( $d=0,47$  мм). В полученном фильтрате измеряли массовую концентрацию тяжелых металлов, микро- и макроэлементов, углерода органических соединений и гидрокарбонат-ионов, общего азота и азотсодержащих соединений (нитрат-, нитрит-, аммоний-ионов), фенола, полициклических ароматических углеводородов (бенз(а)пирен).

Количественный химический анализ (КХА) проб талой воды был проведен в аккредитованной экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (выписка из реестра аккредитованных лиц (аттестат аккредитации) № РОСС RU.0001.511257). Все исследования, включая отбор проб, хранение образцов снежного покрова, их химический анализ, были выполнены в соответствии с действующими нормативными документами.

Для более корректной интерпретации результатов эксперимента полученные данные пересчитывали в соответствующие значения массовой концентрации каждого компонента в снеге на единицу площади, используя следующую формулу:

$$P = \frac{c_m V}{Sn} 10,$$

где  $P$  – масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за весь период сохранения снежного покрова,  $г/м^2$ , или  $мг/м^2$ ;  $c_m$  – массовая концентрация компонента в талой воде,  $мг/дм^3$ , или  $мкг/дм^3$ ;  $V$  – объем талой воды всей пробы,  $дм^3$ ;  $S$  – площадь внутреннего поперечного сечения трубы для отбора проб снега,  $см^2$ ;  $n$  – число кернов снежного покрова, отобранных в данной точке; 10 – коэффициент для согласования размерности.

Для построения тематических цифровых карт исследуемой территории в качестве основы использовали топографические карты ГосГисЦентра (ГГЦ) масштаба 1:200000, предназначенные для открытого пользования [15], переведенные в проекцию WGS 84, UTM. Оцифровку карт и создание карта-схем проводили в программном пакете Arc GIS 9.2. Статистическую обработку данных проводили с использованием программ Arc GIS 9.2, STATISTICA 6.0 и Erdas Imagine 10.0.

#### Обсуждение результатов

Состав газопылевых выбросов целлюлозно-бумажного комбината представлен в табл. 1. Основные компоненты в выбросах – оксиды серы, углерода, азота, карбонатно-сульфатная пыль [16]. Преобладающими показателями загрязнения в жидкой фазе являются  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$  (при условии перехода сульфата натрия при эмиссии в растворимые сульфаты),  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ .

**Таблица 1.** Основной элементный и компонентный состав выбросов предприятия

**Table 1.** Basic element and component composition of the company's emissions

Компоненты выбросов Components of the emission	Элемент Element
$SO_2$ , $SO_4^{2-}$ , $H_2S$ , $CH_3SH$ , $(CH_3)_2S$ , $CH_3S-SCH_3$	S
$NO$ , $NO_2$ , $NH_3$ , $NO_2^-$ , $NO_3^-$	N
$CO_2$ , $CO$ , $HCO_3^-$ , $CO_3^{2-}$ , C (сажа/soot)	C
$Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ , $SiO_3^{2-}$ , $Na^+$ , $K^+$ , $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$	Cl, P, Si, Na, K, Ca, Mg
Малорастворимые соединения Low-soluble compounds	Al, Fe
Не исследованы Not investigated	Микроэлементы Trace elements (Zn, Cu, Ni, Pb, Cd и др.)

Уровень техногенного воздействия предприятия оценивали путем сопоставления уровней поступления веществ на поверхность исследованной территории с фоновыми значениями. Картографический анализ рассеивания выбросов СЛПК показал, что максимальное распространение этих компонентов происходит на расстоянии до 18 км. В качестве условно фоновых уровней поступлений определяемых компонентов были взяты результаты измерений для проб снежного покрова, отобранные на территории в 22 км от источника эмиссии (д. Красная). Проводили оценку поступления веществ главным образом на территорию СЗЗ, условно очерченной вокруг основного источника эмиссии предприятия радиусом 1,5 км.

Степень единообразия в распределении компонентов относительно источника эмиссии оценивали по значениям корреляционных коэффициентов ( $r$ ) между массивами полученных экспериментальных данных. Закономерности распространения компонентов за весь период наблюдений в основном неизменны, о чем свидетельствуют близкие значения коэффициентов корреляции для сравниваемых массивов данных модулей поступлений на подстилающую поверхность (табл. 2).

Анализ средних значений коэффициента корреляции позволил выявить общие закономерности в распределении компонентов снежного покрова в зоне техногенеза: основная доля макро- и микрокомпонентов имеет единые механизмы распространения.

Большое значение в исследованиях было уделено анализу распределения интегральных показателей – удельной электропроводности и водородному показателю. Характеристика электропроводности талой воды, безусловно, является индикатором техногенной нагрузки на территорию. Максимальные значения электропроводности отмечены непосредственно в импактной зоне предприятия (более 200 мкСм/см), что связано с наличием в талой воде растворимых солей.

Высокие значения коэффициентов корреляции отмечены между электропроводностью и основными ионами, за исключением нитрат-ионов и ионов аммония. Вблизи целлюлозно-бумажного комбината возрастают средние содержания сульфат-ионов и ионов натрия ( $r_{Na^+-SO_4^{2-}}=0,71$ , при  $p=0,95$ ). Кислотность та-

лой воды отражает уровень техногенной эмиссии и является индикатором промышленного воздействия [17]. Высокое содержание в выбросах карбонатов и оксидов кальция и магния, дальнейшее их растворение приводят к возрастанию значений pH. Значение pH по мере роста техногенного воздействия в 2019 г. достигало 8,4 при максимальном значении 9,6 в 2005 г. (рис. 2). На фоновых территориях таежной зоны среднее значение водородного показателя составляет 4,8. Наблюдается значимая взаимосвязь между величиной pH и общей минерализацией снеговой воды. Эти интегральные показатели коррелируют между собой:  $r_{\text{pH-а}}=0,65-0,81$  (0,83 в 2019 г.).

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между массивами значений модулей поступлений веществ в растворенной форме (фильтрат) на подстилающую поверхность

**Table 2.** Correlation coefficients between the arrays of values of the modules of the intake of substances in dissolved form (filtrate) on the underlying surface

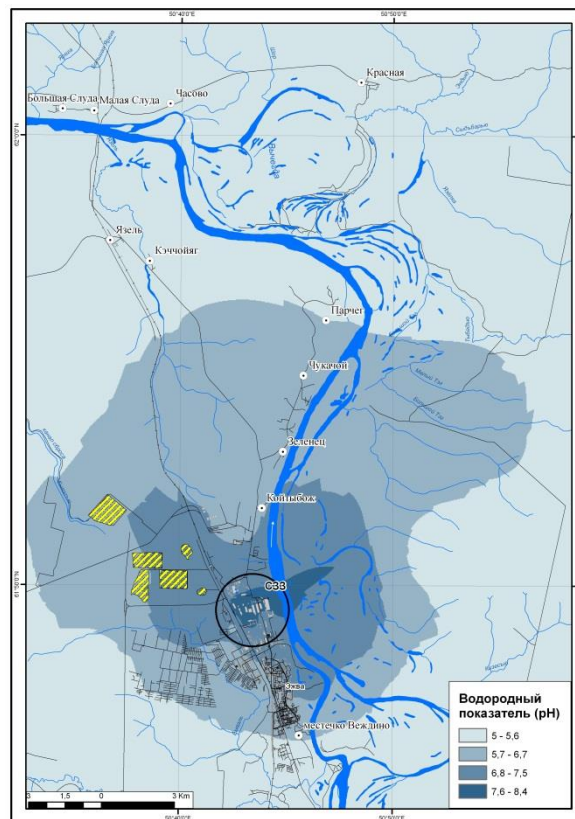
Первый массив (компонент X) First array (component X)	Второй массив (компонент Y) Second array (component Y)	Коэффициент корреляции Correlation coefficient $r(X-Y)$			
		Среднее значение 2002–2007 гг. Average value in 2002–2007	2016 г., $n=44$ , $r_{cr}=0,30$	2019 г., $n=46$ , $r_{cr}=0,30$	Среднее за весь период в границах СЗЗ $n=116$ , $r_{cr}=0,18$ Average for the entire period within the boundaries of the sanitary-protective zone (SPZ)
Na <sup>+</sup>	Удельная электропроводность Electrical conductivity	0,92	0,93	0,74	0,92
Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,85	0,76	0,71	0,79
Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	0,86	0,82	0,82	0,87
Na <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,73	0,80	0,62	0,48
Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	0,68	0,58	0,58	0,43
Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,80	0,66	0,79	0,71
pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,80	0,65	0,74	0,48
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,02	0,34	0,09	0,25
Cu <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	0,33	0,17	–	0,25
Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	0,33	0,47	0,32	0,46
Cu <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	0,21	0,16	0,1	0,06
Ni <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	0,20	0,17	–	0,50

\* – нет данных/no data available.

Корреляционный анализ показывает общность поступления основных компонентов загрязнения территории СЗЗ: ионов натрия, кальция, калия и магния, сульфат-, хлорид-, гидрокарбонат-ионов, серы и фосфора.

Основное количество перечисленных компонентов осаждается в импактной зоне. Нитрат-ионы распространяются исключительно в составе аэрозолей. Поэтому в рабочей и СЗЗ получены минимальные значения модулей поступления нитрат-ионов, осаждение которых происходит лишь на расстоянии 5–7 км от источника газовых выбросов.

Расчет соотношения молярных концентраций эквивалентов главных ионов позволил показать баланс их содержания в талых водах при изменении воздействия эмиссии (табл. 3).



**Рис. 2.** Карта-схема распределения значений водородного показателя (pH) в талой воде (2019 г.)

**Fig. 2.** Map-diagram of distribution of the hydrogen index (pH) values in meltwater (2019)

**Таблица 3.** Соотношения молярных концентраций эквивалентов (моль-экв/дм<sup>3</sup>) главных ионов в жидкой фазе талой воды

**Table 3.** Ratios of molar concentrations of equivalents (mol-eq/dm<sup>3</sup>) of the main ions in the liquid phase of meltwater

Показатель Indicator	СЗЗ SPZ	Фон Background territory	Граница СЗЗ SPZ border
pH	7,6	5,0	7,0
pH <sub>а</sub>	4,2	4,7	4,3
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	46	0,93	2,0
[NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ]+[Ca <sup>2+</sup> ]+[Mg <sup>2+</sup> ]+[Na <sup>+</sup> ]+[K <sup>+</sup> ] [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]+[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]+[Cl <sup>-</sup> ]	5,0	1,05	3,5
[(Ca <sup>2+</sup> ]+[Mg <sup>2+</sup> ])/[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	5,3	0,9	4,7
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/[Cl <sup>-</sup> ]	5,9	3,5	5,0

С использованием средних значений концентраций сульфатов и нитратов, а также хлорид-ионов, вклад которых на территории СЗЗ значим в талой воде, рассчитана кислотность  $\text{pH}_a = -\lg([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-])$ , которая по своему физическому смыслу соответствует pH осадков при условии, что в них не происходит нейтрализации щелочными компонентами.

Значения pH<sub>а</sub> и pH обычно рассматриваются при обсуждении кислотно-основных свойств атмосфер-

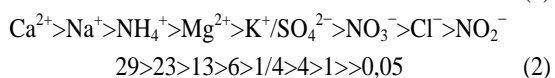
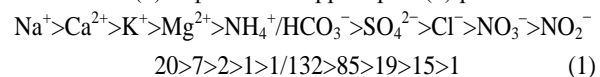
ных осадков [18]. Рассчитанные величины кислотности талых вод указывают на значительную степень нейтрализации анионов в зоне наибольшего воздействия выбросами предприятия. В то время как на более удаленных и фоновых территориях значения рН и рНа близки вследствие снижения доли нейтрализующих компонентов.

Более значимую роль в формировании кислотности снеговых вод играют ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ , о чем свидетельствуют высокие значения отношения  $([\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]) > 1$ . Содержание хлоридов в снеге невелико, и его влияние на кислотные свойства незначительно. Соотношение катионов к анионам еще раз показало, что загрязняющие компоненты имеют подщелачивающие свойства, влияя на рН не только атмосферных осадков, но и почв и грунтовых вод. Содержание катионов в границах СЗЗ в 15 раз превышает фоновый уровень.

Показателем техногенной эмиссии служит отношение  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{Cl}^-]$  в талой воде, которое в зоне техногенного воздействия может достигать 10 [19]. Полученные данные показали, что на фоновых территориях таежной зоны соотношение  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{Cl}^-]$  в среднем составляет 4,4 (3,5 на условных фоновых участках вблизи д. Красная) [20]. В зоне наибольшего воздействия СЛПК возрастает до 38.

Расчеты показали, что наблюдается изменение соотношения основных ионов. Так, в снеге импактной зоны предприятия преобладают ионы натрия. На фоновых территориях преобладающими катионами выступают ионы кальция. Содержание натрия в талой воде на территории СЗЗ составляла 1,0–3,0 г/м<sup>2</sup>, на фоновой – 0,10–0,30 г/м<sup>2</sup>. Однако исследования показали динамику снижения содержания данного поллютанта в снеге СЗЗ за период мониторинга.

Геохимические ряды макрокомпонентов в снеге импактной (1) и фоновых территорий (2) различаются:



В составе выбросов СЛПК основное место занимают пыль и растворимые соли. Результаты исследований показали, что имеет место также локальное загрязнение территории микроэлементами. Распределения тяжелых металлов Fe, Cu, Ni, Pb, Cd, Zn в снеге вокруг СЛПК не имели постоянных четко выраженных зависимостей. Для данных компонентов отмечали невысокие значения коэффициентов корреляции как с макрокомпонентами, так и между собой. Корреляционный анализ данных отдельно в пределах СЗЗ показал более достоверные взаимосвязи между поступлением тяжелых металлов:  $R_{\text{Cu-Zn}}=0,46$ ,  $r_{\text{Ni-Cd}}=0,50$ . Отмечено, что на характер распределения Pb, Cd, Ni в основном влияют факторы, несвязанные с выбросами СЛПК (автотранспорт и автотранспортные предприятия, стройиндустрия, жилищно-коммунальный сектор). Однако максимальные содержания Mn, Zn, Ni, Al, V наблюдаются в снежном покрове территории в пределах СЗЗ. Высокие значе-

ния содержания марганца на территории СЗЗ обусловлены содержанием его соединений в отходах переработки хвойной древесины, что делает марганец маркером выбросов СЛПК. Содержания Mn, Zn, Cu, Ni и V превышают фоновые значения в 12, 3, 2, 4 и 4 раза соответственно за последние периоды наблюдений в 2016 и 2019 гг.

Нужно отметить, что в сравнении с 2005 г., когда проводился анализ ПАУ в снеге на территории СЗЗ и вокруг предприятия, в 2016 г. уровень загрязнения полиаренами сократился более чем в 2 раза, однако среднее содержание в снеге наиболее опасного компонента – бенз[а]пирена – осталось на том же уровне (0,66 мкг/м<sup>2</sup>). Максимум его поступления отмечен на территории СЗЗ. В 2019 г. его содержание на границе СЗЗ составило 3,4 мкг/м<sup>2</sup>, как и в 2018 г. Результаты распределения бенз(а)пирена показали, что более высокие содержания полиаренов наблюдались в снеге Эжвинского района (рис. 3).

Степень техногенного воздействия ПАУ оценивали на основе сопоставления уровней поступления ПАУ на подстилающую поверхность аэротехногенных и фоновых ландшафтов. Если модули поступления суммы ПАУ на территории импактной зоны предприятия в 2016 г. превышали фоновые значения для целлюлозно-бумажного комбината в среднем в 10 раз, на границе СЗЗ в среднем – 5 раз, то в 2019 г. кратность поступления бенз[а]пирена над фоновым составила 20 раз. Так, значения содержания бенз(а)пирена на территории СЗЗ наблюдались в диапазоне 1,6–5,3 мкг/м<sup>2</sup>. На фоновой территории – 0,20 мкг/м<sup>2</sup>.

Наиболее важно для оценки аэрогенного воздействия знать уровень поступления компонентов на территорию СЗЗ СЛПК (табл. 4).

Для этого рассчитывали значение содержания каждого компонента в снеге СЗЗ и их суммарное содержание за каждый год наблюдений. Расчеты показали, что общий объем выбросов на территорию СЗЗ в 2003 г. составил 77 % относительно 2002 г., в 2004 г. – 87 %. В среднем за два года (2003, 2004 гг.) уменьшение выбросов составило 18 % относительно 2002 г. за счет гидрокарбонат-ионов, сульфатов-ионов, ионов натрия, калия.

Существенное снижение загрязнения связано с проведением в 2002 г. реконструкции газоочистных сооружений. Однако в 2005 г. наблюдалось резкое увеличение общего объема выбросов на территорию СЗЗ на 28 % в сравнении с 2002 г., что было обусловлено значительным увеличением производства. В 2006 и 2007 гг. уровень загрязнения снежного покрова СЗЗ был примерно одинаковым и составил 105±107 % от уровня 2002 г.

Результаты расчета модулей поступления веществ на территорию СЗЗ предприятия 2016 г. после его масштабной реконструкции показали наиболее низкий уровень загрязнения снежного покрова за весь период наблюдений, 68 % относительно объемов 2002 г.

Наиболее значимое снижение отмечалось для содержания в снеге сульфат-ионов, натрия, калия, которые являются основными компонентами загрязнения.

**Таблица 4.** Модули поступления (P) макро- и микрокомпонентов на территорию СЗЗ СЛПК за период с 2002 по 2007 гг., в 2016, 2019 гг.

**Table 4.** Modules of receipt (P) of macro- and micro-components to the territory of the SLPC SPZ for the period from 2002 to 2007, in 2016, 2019

Макро- и микрокомпоненты, (кг/км <sup>2</sup> ) Macro- and micro-components, (kg/km <sup>2</sup> )	2002		2003		2004		2005		2006		2007		2016		2019	
	P	%*	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1840	22,05	1350	21,07	1606	22,10	3021	28,31	1838	20,93	1038	11,58	401	7,08	487	8,9
Na <sup>+</sup>	1360	16,30	830	12,96	980	13,49	2097	19,65	2081	23,69	2288	25,53	407	7,18	241	4,4
Ca <sup>2+</sup>	400	4,79	450	7,02	670	9,22	807	7,56	506	5,76	617	6,89	657	11,60	891	16,3
K <sup>+</sup>	290	3,48	190	2,97	260	3,58	314	2,94	233	2,66	252	2,81	86	1,52	114	2,09
Mg <sup>2+</sup>	50	0,60	60	0,94	59	0,81	100	0,93	29	0,33	35	0,39	32	0,56	62	1,13
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	160	1,92	280	4,37	28	0,39	32	0,30	43	0,49	8	0,09	24	0,43	25	0,45
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	7	0,08	5	0,08	7	0,10	8	0,08	6	0,07	5	0,05	4,5	0,08	1,3	0,02
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4000	47,9	3000	46,8	3460	47,6	3935	36,9	3195	36,4	4239	47,3	3720	65,7	3516	64,3
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	25	0,30	50	0,78	35	0,48	163	1,53	21	0,21	0,22	0,00	27	0,47	53,7	0,98
Cl <sup>-</sup>	200	2,40	180	2,81	154	2,12	181	1,70	823	9,37	321	3,6	301	5,3	68,0	1,24
Mn	6,5	0,078	7,5	0,12	3,31	0,05	7,81	0,073	5,78	0,066	7,07	0,079	4,76	0,084	9,6	0,18
Cu	0,32	0,004	0,15	0,23	0,3	0,004	0,16	0,002	0,12	0,001	0,45	0,005	0,06	0,001	0,14	0,003
Ni	0,16	0,002	0,24	0,004	0,49	0,007	0,22	0,002	0,30	0,003	0,08	0,001	0,01	0,000	0,06	0,001
Pb	0,106	0,001	0,121	0,002	0,09	0,001	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cd	0,044	0,001	0,021	0,000	0,149	0,002	0,06	0,001	0,30	0,003	0,004	0,000	0,01	0,000	–	–
Zn	4,3	0,052	2,65	0,041	1,02	0,014	0,87	0,008	1,15	0,013	1,55	0,017	1,25	0,022	1,8	0,033
Фенолы/Phenols	0,7	0,008	0,29	0,005	0,24	0,003	4,59	0,043	1,40	0,016	0,49	0,005	0,76	0,013	1,0	0,018
<b>Итого/Total</b>	<b>8344</b>	<b>100</b>	<b>6406</b>	<b>100</b>	<b>7266</b>	<b>100</b>	<b>10671</b>	<b>100</b>	<b>8782</b>	<b>100</b>	<b>8961</b>	<b>100</b>	<b>5667</b>	<b>100</b>	<b>5471</b>	<b>100</b>
Относительно суммарного модуля поступления в 2002 г. Relative to the total admission module in 2002	1,00		0,77		0,87		1,28		1,05		1,07		0,68		0,66	

\* – Доля компонента от общего суммарного модуля поступления всех приведенных компонентов/Share of the component from the total module of receipt of all the listed components.

Среди микрокомпонентов существенное снижение нагрузки отмечено для меди и никеля, которые не являются специфическими компонентами эмиссии данного предприятия. В 2019 г. модули поступления веществ на территорию СЗЗ сохранились на уровне 2016 г. Отмечалось снижение в поступлении поллютантов доли ионов натрия и хлорид-ионов.

Большая разница в поступлении веществ между 2007 и 2016 гг. связана с модернизацией предприятия и успешным изменением в его технологических процессах.

Отдельно оценивали уровень загрязнения талых вод с территории предприятия органическими компонентами. Среднее значение ХПК в 2007 г. на территории СЗЗ составило 40,3 мг О/дм<sup>3</sup>, в 2016 г. – 28,4 мг О/дм<sup>3</sup>, в 2019 г. составило 14,5 мг О/дм<sup>3</sup>. Нужно подчеркнуть, что по экспериментальным данным исследований в 2007 г. около 70 % органических соединений – это нерастворимые в воде компоненты, в составе пылевых частиц, на это указывает сравнение данных по углероду, рассчитанному из значений ХПК (нефильтрованная проба), содержание которого на территории СЗЗ 1,7 г/м<sup>2</sup> и общему органическому углероду (фильтрованная проба = ТОС), содержание которого в снеге 0,5 г/м<sup>2</sup>.

При том, что общее содержание органического углерода в снеге СЗЗ значительно снизилось, присутствие фенолов остается постоянным в течение всего периода мониторинга, даже после модернизации, в 2016–2019 гг., отмечается поступление на уровне среднего за весь период мониторинга.

**Таблица 5.** Матрица коэффициентов корреляции между органическими компонентами в снежном покрове

**Table 5.** Matrix of correlation coefficients between organic components in snow cover

Первый массив (компонент X) First array (component X)	Второй массив (компонент Y) Second array (component Y)	Коэффициент корреляции Correlation coefficient r (X–Y)		
		2005	2016	2019
Сумма ПАУ Amount of polyarenes	ХПК Chemical oxygen consumption	0,63	0,78	0,54
	Фенол/Phenol	0,79	0,73	0,35
бенз[а]пирен benz [a]pyrene	ХПК Chemical oxygen consumption	0,60	0,63	0,33
	Фенол/Phenol	0,55	0,65	–*

\* – нет данных/no data available.

Проведенные расчеты показали достаточно высокие значения коэффициента корреляции между массивами значений органического углерода (ХПК), содержанием фенола и суммарного содержания ПАУ и бенз(а)пирена (табл. 5), т. е. эти компоненты в снеге территории исследования характеризуются общим источником их поступления в окружающую среду. Подобные взаимосвязи проявляются у органических компонентов с общим содержанием органического вещества вблизи других источников эмиссии [21].

Анализ результатов по распределению ПАУ в снежном покрове как фоновой, так и техногенной территорий, показал наличие в нем в основном низкомолекулярных полиаренов, таких как фенантрен, флуорантен, пирен, хризен.

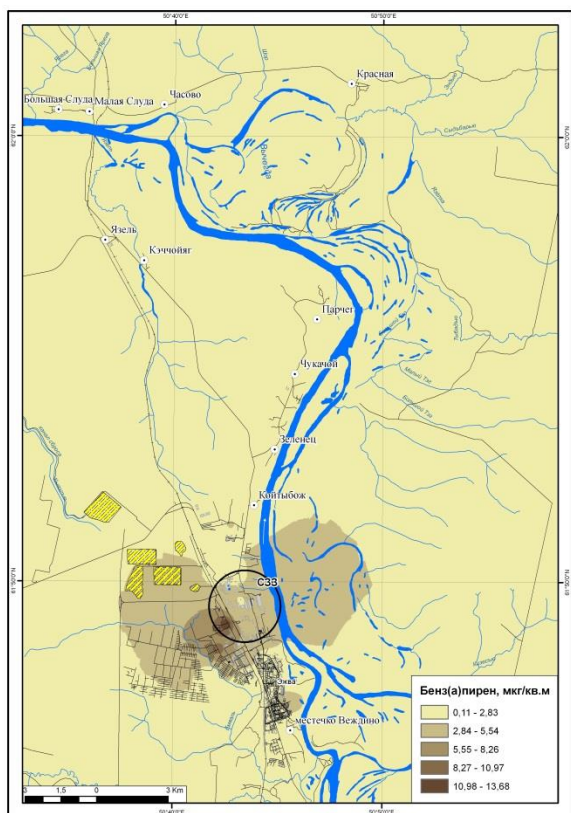


Рис. 3. Карта-схема распределения содержания бенз(а)пирена в талой воде в 2019 г.

Fig. 3. Map-scheme of benz(a)pyrene content distribution in meltwater in 2019

Талые воды с территории СЗЗ – одна из категорий вод, качество которых относительно общепринятых нормативов важно знать. Сравнение проводили с ПДК для вод рыбохозяйственного назначения (ПДК<sub>р.х.</sub>). Содержание большинства определяемых компонентов в талых водах было ниже ПДК<sub>р.х.</sub>, в том числе в образцах снежного покрова с территории промзоны. Однако для некоторых компонентов весь период наблюдений повторялось превышение ПДК<sub>р.х.</sub>. Наблюдалось превышение нормативов на территории СЗЗ для нитрит-ионов (до 5,8 ПДК<sub>р.х.</sub>), для марганца (до 5,9 ПДК<sub>р.х.</sub>) и фенола (до 12 ПДК<sub>р.х.</sub>), редкие превышения нормативов – по цинку, меди и

бенз(а)пирену. Превышений норматива ПДК<sub>р.х.</sub> за пределами СЗЗ за время всего периода наблюдения не обнаружено, загрязнение носило локальный характер.

В качестве дополнительной оценки степени аэротехногенного воздействия на исследованную территорию производили расчет суммарного индекса загрязнения снежного покрова ( $Z_c$ ), который представляет собой сумму превышений концентраций веществ над их фоновым уровнем [22, 23].

При значениях более 32 предполагают увеличение риска заболеваемости населения (средний уровень воздействия), при значениях  $Z_c$  более 128 территорию относят к чрезвычайно опасной категории загрязнения. Так, согласно полученным значениям  $Z_c$  для СЗЗ СЛПК отмечается высокий уровень техногенной нагрузки: максимальные значения превышали 300. На границе СЗЗ с севера данный показатель значительно ниже и составляет 128–135. На южной границе СЗЗ этот показатель меньше 128.

Согласно средним значениям расчетов суммарного индекса загрязнения за 2015–2016 гг. и 2018–2019 гг. в районе влияния выбросов предприятия были условно выделены зоны с различным уровнем техногенной нагрузки (рис. 4):

- I зона очень высокого воздействия включает территорию СЗЗ АО «Монди СЛПК» с распространением на север и северо-восток от границы СЗЗ на 3,5 км;
- II зона высокого воздействия выбросов – охватывает территорию от границ первой зоны на расстояние до 8–9 км на север и северо-восток от границы СЗЗ;
- III зона среднего воздействия выбросов – охватывает территорию от границ второй зоны на расстояние до 11 км на север и северо-восток от границ СЗЗ;
- IV зона за пределами зоны III, где отсутствует либо слабое воздействие выбросов предприятия (вблизи границы зоны).

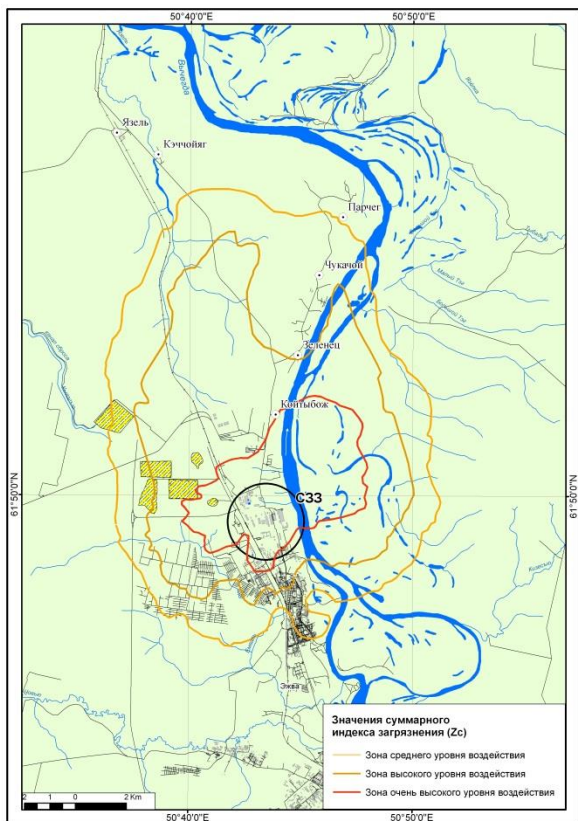
Проведен анализ изменения площадного распространения зон воздействия на прилегающие к АО «Монди СЛПК» территории. С помощью картографических средств рассчитаны площади трех зон воздействия для начального периода мониторинга (2001–2002 гг.), перед реализацией программы «СТЕР» (2006–2007 гг.) и после значительной реконструкции предприятия (расчет средних параметров расположения зон воздействия за 2015–2016 гг. и 2018–2019 гг. (табл. 6).

Таблица 6. Площади зон воздействия (км<sup>2</sup>), рассчитанные на основе суммарного индекса загрязнения ( $Z_c$ )

Table 6. Areas of impact zones (km<sup>2</sup>) calculated on the basis of the total pollution index ( $Z_c$ )

Период исследования Study period	I (128)	II (64)	III (32)
2001–2002	23	114	300
2006–2007	31	142	274
$\bar{x}$ (2015–2016; 2018–2019)	28	102	174

\* –  $\bar{x}$  среднее значение за 2 года/average value for two years.



Таким образом, площади зон воздействия выбросов предприятия значительно изменились с начала мониторинга. При том, что зона очень высокого воздействия за счет преобладания пылевых компонентов, которые оседают вблизи к источнику эмиссии предприятия хоть и сократилась в сравнении с 2007 г. незначительно, другие зоны значительно уменьшились по площади за счет более рассеивающихся компонентов. Площадь зоны I (очень высокого воздействия) по данным 2015–2019 гг. уменьшилась в минимальной степени – на 9,7 %. За тот же период площадь зоны II (сильного воздействия) уменьшилась на 28,2 %, зоны III (среднего воздействия) – на 36,5 % (рис. 5).

Наглядный анализ границы III зоны воздействия выбросов предприятия для разных лет показывает, насколько сократилась область воздействия, начиная с начала периода мониторинга, в первую очередь, в связи с уменьшением объема выбрасываемых в атмосферу веществ (рис. 5).

Рис. 4. Зоны аэрогенного воздействия эмиссии предприятия за 2016 и 2019 гг.

Fig. 4. Zones of aerogenic impact of the company's emissions for 2016 and 2019

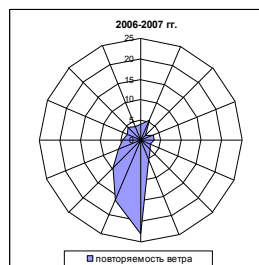
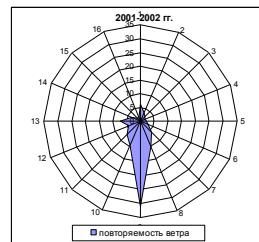
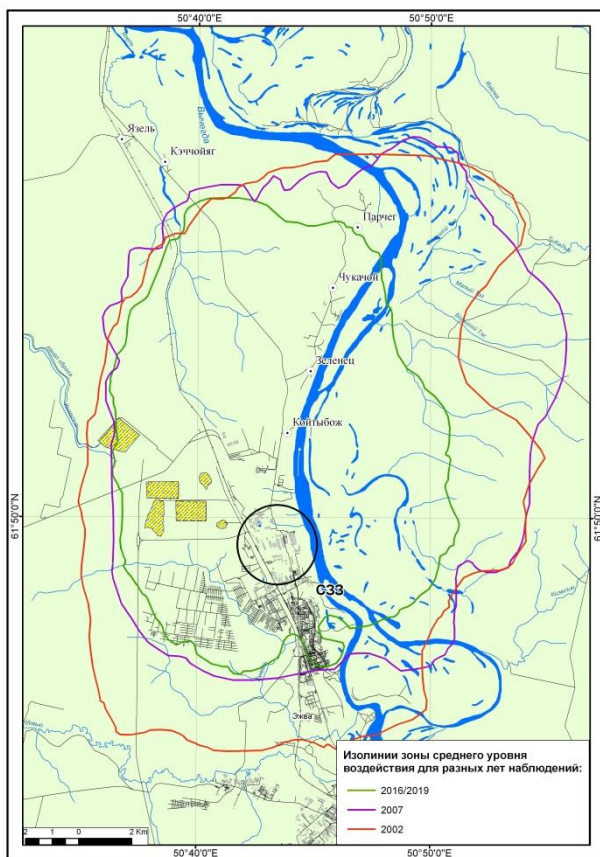


Рис. 5. Карта-схема расположения границы III зоны по интенсивности воздействия выбросов и «розы ветров» для соответствующих зимних периодов

Fig. 5. Map-diagram of the zone III border location by the intensity of the impact of emissions a benz[a]pyrene and «wind rose» for the corresponding winter periods



Очевидно, на распространение зон и фактор рассеивания повлияли метеорологические параметры, в частности ветровой режим. В сравнении с последними данными зоны воздействия распространялись дальше от источника эмиссии на восток и север. Также в последние годы наблюдалось снижение северных направлений ветров в зимнее время, поэтому шлейф от выбросов АО «Монди СЛПК» в меньшей степени стал уходить на юг от СЗЗ, чем ранее, в 2001–2002 гг. Жилая застройка Эжвинского района города Сыктывкара с учетом «розы ветров» в настоящее время находится в зоне среднего воздействия.

#### Заключение

Представлены результаты экохимического мониторинга снежного покрова в зоне аэротехногенного воздействия выбросов АО «Монди СЛПК». Дана общая характеристика распределения индивидуальных компонентов выбросов относительно центра эмиссии. Длительный мониторинг снежного покрова в импактной и санитарно-защитной зонах предприятия позволил провести анализ динамики аэротехногенной нагрузки на территорию.

Снег с территории предприятия характеризуется щелочной реакцией за счет поступления гидрокарбонатной пыли, соединений кальция и магния. Ионные соотношения в талой воде весьма сильно отличны от таковых на условно фоновой территории. В качестве катионов преобладают ионы натрия, анионов – гидроксид-ионы.

Результаты расчета модулей поступления веществ на территорию предприятия в 2019 г. показали наиболее низкий уровень загрязнения снежного по-

крова за весь период наблюдений, 66 % относительно объемов 2002 г. Отмечено значительное снижение содержания компонентов в снеге, начиная с 2016 г. после реконструкции предприятия. Наиболее значительное снижение загрязнения отмечается по следующим компонентам: ионы натрия, хлорид-ионы, сульфат-ионы, нитрат- и нитрит-ионы.

Пробы талой воды снежного покрова за пределами территории санитарно-защитной зоны не превышают санитарно-гигиенических нормативов для рыбохозяйственных водоемов (ПДК<sub>рх</sub>) для всех компонентов. Однако на территории СЗЗ для нитрит-ионов, марганца, фенола, цинка, меди и бенз(а)пирена превышения ПДК наблюдались.

Составлены карты распределения выбросов макро- и микрокомпонентов в снежном покрове исследованной территории. Согласно расчетам техногенной нагрузки на основе суммарного индекса загрязнения были выделены зоны воздействия. Аэротехногенное воздействие СЛПК по направлению результирующего вектора «розы ветров» для большинства поллютантов ограничивается расстоянием 11 км от границы СЗЗ. Площади зон воздействия, рассчитанные на основе суммарного индекса загрязнения снежного покрова в сравнении с результатами 2007 г., после программы «СТЕР» значительно сократились на 9,7 % для I зоны, на 28,2 и 36,5 % для II и III зоны, соответственно.

В целом на основе результатов экохимического мониторинга снежного покрова показан тренд к снижению аэротехногенного воздействия предприятия на прилегающую территорию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atmospheric deposition: sampling procedures, analytical methods, and main recent findings from the scientific literature / M. Amodio, S. Catino, P.R. Dambrosio, G. Gennaro, A. Di Gilio, P. Giungato, E. Laiola, A. Marzocca, A. Mazzone, A. Sardaro, M. Tutino // *Advances in Meteorology*. – 2014. – V. 2014. – 27 p. DOI: 10.1155/2014/161730.
2. Котова Е.И. Влияние морского аэрозоля на состав снега прибрежной зоны западного сектора арктических морей // *Успехи современного естествознания*. – 2019. – № 10. – С. 158–163.
3. Winter and summer nitrous oxide and nitrogen oxides fluxes from a seasonally snow-covered subalpine meadow at Niwot Ridge, Colorado / G. Filippa, M. Freppaz, M.W. Williams, D. Helmig, D. Liptzin, B. Seok, B. Hall, K. Chowanski // *Biogeochemistry*. – 2009. – № 95. – P. 131–149.
4. Filimonova L.M., Parshin A.V., Bychinskii V.A. Air pollution assessment in the area of aluminum production by snow geochemical survey // *Russian meteorology and hydrology*. – 2015. – V. 40. – № 10. – P. 691–698.
5. Пространственное распределение тяжелых металлов в пробах снега вокруг северодвинского промышленного района / Е.Ю. Яковлев, Е.Н. Зыкова, С.Б. Зыков, А.А. Очеретенко // *Успехи современного естествознания*. – 2019. – № 11. – С. 179–184.
6. Химический состав снега акватории озера Байкал и прилегающей территории / И.А. Белозерцева, И.Б. Воробьева, Н.В. Власова, М.С. Янчук, Д.Н. Лопатина // *География и природные ресурсы*. – 2017. – № 1. – С. 90–99.
7. Мониторинг качества снегового покрова, как составляющей среды обитания населения г. Самары / О.В. Сазонова, И.Ф. Сухачева, Н.И. Дроздова, О.Н. Исакова, П.А. Сухачев, Л.Н. Вистяк // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 10 (часть 1). – С. 174–179.
8. Химический состав снега на урбанизированных территориях в условиях Крайнего Севера / Н.В. Салтан, Е.П. Шлапак, В.К. Жиров, О.Б. Гонтарь, Е.А. Святковская // *Вестник МГТУ*. – 2015. – Т. 18. – № 2. – С. 328–334.
9. Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С. Химический состав атмосферных осадков российского заполярья // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 27–36.
10. Snow pollution in Lake Baikal water area in nearby land areas / I.A. Belozertseva, I.B. Vorobyeva, N.V. Vlasova, D.N. Lopatina, M.S. Yanchuk // *Water Resources*. – 2017. – V. 44. – P. 471–484.
11. Grebenshchikova V.I., Efimova N.V., Doroshkov A.A. Chemical composition of snow and soil in Svirsk city (Irkutsk Region, Pribaikal'e) // *Environmental Earth Sciences*. – 2017. – V. 76:712. DOI: 10.1007/s12665-017-7056-0.
12. The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale / G. Jost, M. Weiler, D.R. Gluns, Y. Alila // *Journal of Hydrology*. – 2007. – V. 347. – P. 101–115.
13. Василенко В.Н., Наумов И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 181 с.
14. Атлас по климату и гидрологии Республики Коми. – М.: Дрофа; ДиК, 1997. – 116 с.
15. <http://loadmap.net>
16. Sumathi S., Hung Y.T. Treatment of pulp and paper mill wastes // *Waste treatment in the process industries* / Eds. L.K. Wang, Y.T. Hung, H.H. Lo, C. Yapijakis. – Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. – P. 453–497.
17. Оценка аэротехногенного загрязнения вблизи промышленных предприятий в тундровой (на примере г. Воркуты) / М.И. Василевич, Р.С. Василевич, Д.Н. Габов, Б.М. Кондратёнок // *Геоэкология*. – 2019. – № 6. – С. 94–105.

18. Miller J.D., Anderson H.A., Harriman R. The consequences of liming a highly acidified catchment in central Scotland // *Acidic Depos.: Sci and Policy: Pap. 5th Int. Conf. V. 2. Water, Air, and Soil Pollution.* – Goteborg, 26–30 June, 1995. – P. 1015–1020.
19. Давыдова Н.Д. Техногенная трансформация топогеосистем при воздействии пылегазовых эмиссий: автореф. ... д-ра географ. наук. – Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2001. – 53 с.
20. Химический состав снежного покрова на территории таежной зоны Республики Коми / М.И. Василевич, Б.Н. Кондратенко, В.А. Безносиков // *Водные ресурсы.* – 2011. – Т. 38. – № 4. – С. 494–506.
21. Накопление полициклических ароматических углеводородов в снежном покрове вблизи предприятий топливно-энергетического комплекса вокруг г. Воркута / Д.Н. Габов, Е.В. Яковлева, М.И. Василевич, Р.С. Василевич // *Геозология.* – 2019. – № 1. – С. 24–37.
22. Сагг Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
23. Snow cover study in the zone of influence of the Severonickel plant / M. Slipenchuk, S. Kirillov, E. Vorobievskaya, N. Sedova // *Arctic: History and Modernity: 5th International Conference. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* – 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012030.

Поступила 20.09.2021 г.

#### Информация об авторах

**Василевич М.И.**, кандидат биологических наук, научный сотрудник группы компьютерных технологий и моделирования Института Биологии ФИЦ КНЦ УрО РАН.

**Кондратёнок Б.М.**, кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе Института Биологии ФИЦ КНЦ УрО РАН.

**Очеретенко Д.П.**, главный эколог отдел охраны окружающей среды АО «Монди СЛПК».

**Василевич Р.С.**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник группы химии почв Института Биологии ФИЦ КНЦ УрО РАН.

**Габов Д.Н.**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник экоаналитической лаборатории Института Биологии ФИЦ КНЦ УрО РАН.

**Лодыгин Е.Д.**, доктор биологических наук, старший научный сотрудник группы химии почв Института Биологии ФИЦ КНЦ УрО РАН.

UDC 504.3.054

## MONITORING OF AEROTECHNOGENIC IMPACT OF SYKTYVKAR TIMBER INDUSTRY COMPLEX

**Maria I. Vasilevich<sup>1</sup>,**  
mvasilevich@ib.komisc.ru

**Boris M. Kondratenok<sup>1</sup>,**  
kondratenok@ib.komisc.ru

**Dmitry P. Ocheretenko<sup>2</sup>,**  
dmitry.ocheretenko@mondigroup.com

**Roman S. Vasilevich<sup>1</sup>,**  
vasilevich.r.s@ib.komisc.ru

**Dmitry N. Gabov<sup>1</sup>,**  
gabov@ib.komisc.ru

**Evgeny D. Lodygin<sup>1</sup>,**  
lodigin@ib.komisc.ru

<sup>1</sup> Institute of Biology, FRC, Komi SC UB RAS,  
28, Kommunisticheskaya street, Syktyvkar, 167982, Russia.

<sup>2</sup> Mondi Syktyvkar JSC,  
2, Bumazhnikov avenue, Syktyvkar, 167026, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to assess the level of impact of a large pulp and paper enterprise located north of the Ezhvinsky district of Syktyvkar on the basis of ecochemical analysis of winter precipitation (snow), to show the feasibility of using this approach in environmental studies.

**The main aim** is to show the dynamics of the aerotechnogenic load on the territory near the Syktyvkar timber industry complex based on the data on snow cover chemical composition during the monitoring period.

**Objects:** snowpack samples, selected in the zone of influence of emissions of Mondi Syktyvkar JSC and conditionally background areas.

**Methods:** snow survey using transect, adhering to constant sampling points, application of analytical methods according to the air pollution control manual (GD 52.04.186-89), cartographic methods for estimating the spread of pollution in the snow cover using the interpolation method (inverse weighted distance method), application of map algebra for calculating the areas of impact zones.

**Results.** The authors present the results of ecochemical monitoring of snow cover in the zone of aerotechnogenic impact of emissions Mondi Syktyvkar JSC for a multi-year period. A general description of the distribution of individual components of emissions relative to the emission center is given. Long-term monitoring of snow cover in the impact and sanitary protection zones of the enterprise allowed us to analyze the dynamics of the aerotechnogenic load on the territory. The results of the calculation of the modules of substances entering the territory of the enterprise in 2019 showed the lowest level of contamination of the snow cover for the entire observation period, 66 % compared to the volumes of 2002. A significant decrease in the content of components in the snow was noted, starting in 2016 after the reconstruction of the enterprise. Samples of snowmelt water outside the territory of the sanitary protection zone do not exceed the sanitary and hygienic standards for fisheries reservoirs for all components. In general, based on the results of ecochemical monitoring of snow cover, the trend towards reducing the aerogenic impact of the enterprise on the adjacent territory is shown.

### Key words:

Snow cover, ecochemical monitoring, pulp and paper enterprise, impact dynamics, impact zones.

### REFERENCES

1. Amodio M., Catino S., Dambruoso P.R., Gennaro G., Di Gilio A., Giungato P., Laiola E., Marzocca A., Mazzone A., Sardaro A., Tutino M. Atmospheric deposition: sampling procedures, analytical methods, and main recent findings from the scientific literature. *Advances in Meteorology*, 2014, vol. 2014, 27 p.
2. Kotova E.I. Influence of marine aerosol on the composition of snow in the coastal zone of the western sector of the Arctic seas. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 10, pp. 158–163. In Rus.
3. Filippa G., Freppaz M., Williams M.W., Helmig D., Liptzin D., Seok B., Hall B., Chowanski K. Winter and summer nitrous oxide and nitrogen oxides fluxes from a seasonally snow-covered subalpine meadow at Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry*, 2009, no. 95, pp. 131–149.
4. Filimonova L.M., Parshin A.V., Bychinskii V.A. Air pollution assessment in the area of aluminum production by snow geochemical survey. *Russian meteorology and hydrology*, 2015, vol. 40, Iss. 10, pp. 691–698.
5. Yakovlev E.Yu., Zykova E.N., Zykov S.B., Ocheretenko A.A. Spatial distribution of heavy metals in snow samples around Severodvinsk industrial district. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 11, pp. 179–184. In Rus.
6. Belozertseva I.A., Vorobyova I.B., Vlasova N.V., Yanchuk M.S., Lopatina D.N. Chemical composition of snow in the water area of Lake Baikal and the surrounding area. *Geography and natural resources*, 2017, no. 1, pp. 90–99. In Rus.
7. Sazonova O.V., Sukhacheva I.F., Drozdova N.I., Isakova O.N., Sukhachev P.A., Vistyak L.N. Monitoring the quality of snow cover as a component of the habitat of the population of Samara. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2014, no. 10, pp. 174–179. In Rus.
8. Saltan N.V., Shlapak E.P., Zhiron V.K., Gontar O.B., Svyatkovskaya E.A. Chemical composition of snow in urbanized areas in the Far North. *Vestnik MGTU*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 328–334. In Rus.

9. Semenets E.S., Svistov P.F., Talash A.S. Chemical composition of atmospheric precipitation in the Russian Arctic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 27–36. In Rus.
10. Belozertseva I.A., Vorobyeva I.B., Vlasova N.V., Lopatina D.N., Yanchuk M.S. Snow pollution in Lake Baikal water area in nearby land areas. *Water Resources*, 2017, vol. 44, pp. 471–484.
11. Grebenshchikova V.I., Efimova N.V., Doroshkov A.A. Chemical composition of snow and soil in Svirsk city (Irkutsk Region, Pribaikal'e). *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76 (720).
12. Jost G., Weiler M., Gluns D.R., Alila Y. The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale. *Journal of Hydrology*, 2007, vol. 347, pp. 101–115.
13. Vasilenko V.N., Naumov I.M., Fridman Sh.D. *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 181 p.
14. *Atlas po klimatu i gidrologii Respubliki Komi* [Atlas of climate and hydrology of the Komi Republic]. Moscow, Drofa; DiK Publ., 1997. 116 p.
15. <http://loadmap.net>
16. Sumathi S., Hung Y.T. Treatment of pulp and paper mill wastes. *Waste treatment in the process industries* Eds. L.K. Wang, Y.T. Hung, H.H. Lo, C. Yapijakis. Boca Raton, Taylor&Francis, 2006. pp. 453–497.
17. Vasilevich M.I., Vasilevich R.S., Gabov D.N., Kondratyuk B.M. *Otsenka aerotekhnogennoy zagryazneniya vblizi promyshlennykh predpriyatiy v tundrovoy (na primere g. Vorkuty)* [Assessment of aerotechnogenic pollution near industrial enterprises in tundra (on the example of Vorkuta)]. *Geoekologiya*, 2019, no 6, pp. 94–105.
18. Miller J.D., Anderson H.A., Harriman R. The consequences of liming a highly acidified catchment in central Scotland. *Pap. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Acidic Depos.: Sci and Policy. Vol. 2. Water, Air, and Soil Pollution*. Goteborg, 26–30 June, 1995. pp. 1015–1020.
19. Davydova N.D. *Tekhnogennaya transformatsiya topogeosistem pri vozdeystvii plegazovykh emissiy*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Technogenic transformation of topogeodesical when exposed to dust and gas emissions. Cand. Diss. Abstract]. Irkutsk, 2001. 53 p.
20. Vasilevich M.I., Kondratenok B.N., Beznosikov V.A. Khimicheskiy sostav snezhnogo pokrova na territorii taezhnoy zony Respubliki Komi [Chemical composition of snow cover in the taiga zone of the Komi Republic]. *Vodnye resursy*, 2011, vol. 38, no. 4, pp. 494–506.
21. Gabov D.N., Yakovleva E.V., Vasilevich M.I., Vasilevich R.S. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover near the enterprises of the fuel and energy complex around Vorkuta. *Geoekologiya*, 2019, no. 1, pp. 24–37. In Rus.
22. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushhey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
23. Slipenchuk M., Kirillov S., Vorobievskaya E., Sedova N. Snow cover study in the zone of influence of the Severonickel plant. *5<sup>th</sup> International Conference. Arctic: History and Modernity. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012030.

Received: 20 September 2021.

#### Information about the authors

**Maria I. Vasilevich**, Cand. Sc., researcher, Institute of Biology, FRC, Komi SC UB RAS.

**Boris M. Kondratenok**, Cand. Sc., deputy director, Institute of Biology, FRC, Komi SC UB RAS.

**Dmitry P. Ocheretenko**, main ecologist, Mondy Syktyvkar JSC.

**Roman S. Vasilevich**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Biology, FRC, Komi SC UB RAS.

**Dmitry N. Gabov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Biology, FRC, Komi SC UB RAS.

**Evgeny D. Lodygin**, Dr. Sc., senior researcher, Institute of Biology, FRC, Komi SC UB RAS.

UDC 624.131.1

## ASSESSMENT OF HAZARDOUS ENGINEERING-GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL PROCESSES ON THE ALMATY CITY TERRITORY

**Altynay E. Zhakyp<sup>1</sup>**,  
a.zhakyp@stud.satbayev.university

**Vladimir M. Mirlas<sup>2</sup>**,  
vladimirm@ariel.ac.il

**Yergali S. Auelkhan<sup>1</sup>**,  
y.auelkhan@satbayev.university

<sup>1</sup> Satbayev University,  
22a, Satbayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan.

<sup>2</sup> Ariel University, Eastern Israel R&D Center,  
65, Ramat HaGolan street, Ariel, 40700, Israel.

**The relevance** of the research is caused by the need to study hazardous engineering-geological and hydrogeological processes developing on Almaty city territory that pose a threat to the life of urban residents and to industrial and civil building. In addition, the relevance of the research is caused by the need to assess the human economic activity impact on the geological environment state.

**Purpose:** description and zoning of the Almaty city territory according to the type and modern state of development of hazardous geological processes and identification of the most hazardous areas potential, from the point of view of the development of hazardous geological processes for their detailed study; selection of an experimental site for assessing and prediction buildings underflooding development using a geofiltration models.

**Objects:** landslides, landfalls, mudflow phenomena developing in the foothill sites; the groundwater level rising in the central part of the city in the sites of existing water intakes facilities; underflooding of certain sites in the northern part of the city.

**Methods:** research and classification of hazardous geological processes developing in the Almaty city; systematization and analysis of the main factors due to the filling and development on the territory, based on the results of earlier field investigations and published works; field research and mapping of the selected experimental site; creation of a database, including climatic, geological, hydrological, hydrogeological data; route survey of the experimental site, the groundwater level monitoring in observation wells; observations of the state of river flow and flood events.

**Results.** On the territory of Almaty city, there are three main groups of hazardous geological processes associated with certain areas: 1 – landslides, landfalls, mudflows developing in the foothill areas of the city; 2 – groundwater level rising in central part of the city, where existing water intakes, leading to increase in the seismicity level; 3 – underflooding resulting from the deterioration of the natural drainage of territory due to the filling and planning of the existing depressions in the relief and the «karasu» rivers. The assessment of the potential underflooding of the territory allowed us to class it as the first degree in terms of potential underflooding. The estimated period of the territory underflooding will be from 4 to 5 years. Taking into account the dynamics of the process of the territory underflooding, it is concluded about the necessity to create a geofiltration model for predictive assessment of the process development of buildings flooding on this territory.

### **Key words:**

Hazardous geological processes, urban area, underflooding, groundwater, monitoring.

### **Introduction**

Hazardous engineering-geological (HGP) and hydrogeological processes refer to geologic phenomena that are formed under the influence of natural or human factors and cause losses to human life and property, as well as damages to the environment [1]. Common types of geologic hazards in urban areas include earthquakes, ground subsidence, landslides, mudflows, ground fissures, soil erosion, underflooding and water pollution [2]. The research on geologic hazards mainly focuses on the establishment of disaster prediction models. To predict the landslide disaster, Liu and Wu [3] proposed a landslide recognition framework. Bovolenta, Bianchi [4] in their research uses three-dimensional numerical model to predict slope behavior in occurrence of water table fluctuations in Ville San Pietro. In addition, Nsengiyvva and Valentino [5] uses GIS-based machine learning simulations to forecast landslides susceptibility and risks.

Orozco, Caballero and Nader [6] studied the early warning system of the flood disaster, developed intelligent disaster prediction application program. Leng, Liu and Mei [7] established a geologic hazard prediction model, which could provide decision support for disaster prevention and mitigation, also accesses warning model services and realizes comprehensive information management, monitoring, and warnings of multiple types of geological disasters. Causes of some HGP on urban territories was described on the example of a representative part of Kiev city. It was found that violation of the safe habitation conditions in cities is related to the unsuccessful placement of objects in different functional zones that have different degrees of safety of the inhabitation. It happens in case of HGP, together with emergency situations. Changing the groundwater level and soil water content have the most dangerous influence among the considered effects [8].

Anker et al. assessed the effect of rapid urbanization on Mediterranean karstic mountainous drainage basins in Israel. In order to prevent flooding, the urban areas should be planned with runoff infiltration zones in a way that will prevent their hydrological effect on the adjacent natural drainage systems. In addition to flood mitigation and groundwater recharge, the vacant land used as runoff absorbing strata provides social benefits for the surrounding community [9].

Almaty city is situated on the Ile Alatau foothill zone. Currently, in Almaty agglomeration is place more than 1,5 million people with high density. The territory is characterized by a high concentration of industrial facilities, residential buildings, summer cottages, engineering communications. Beginning from the 90s of the last century, here the intensive housing development was began in the foothills of the Ile Alatau range, which is most susceptible to HGP [10]. The building was carried out without installation of a drainage canals network for intensive surface runoff. Irrigation of sites located on landslide slopes was uncontrolled. As a result, in recent years there was an activation of slope gravitational processes, which, unfortunately, led to human losses [11]. Since HGP in the foothill zone is extended in time, its intensification is expected in the near future. Considering that the foothill zone of Ile Alatau locate in the zone of 9–10 magnitude earthquakes [12], even an earthquake with an intensity of 5–6 magnitudes may provoke here numerous gravitational displacements. The map of engineering-geological zoning of the territory of Almaty city and its suburbs according to the conditions of development and intensity of HGP at a scale of 1:50,000 was composed by Mustafayev et al. [10]. On this map the points for organizing monitoring of HGP in the area of Almaty city were recommended.

From 2004 to 2006, «Almatyhydrogeology» LTD carried out the work for monitoring dangerous geological processes at Kaskelen-Talgar test site. The work was carried out according to the VSEGINGEO methodical guide [13–15]. Regular observations were carried out to study the dynamics of development of hazardous geological processes at 27 stationary observation posts in Almaty region on the area of Kaskelen-Talgar test site. The observation results were submitted in report [16]. For a proper feasibility study the engineering works for preventing HGP development it is necessary to comprehensively investigate the engineering-geological situation of HGP manifestation areas, to analyze their intensity, to research the physical and mechanical properties of soils and rocks, and also to reasonably predict the dynamics of these processes' development in time.

#### **The main types of the hazardous engineering-geological and hydrogeological processes on Almaty city territory**

Overview map and layouts of the studied sites on the Almaty city territory shown on Fig. 1.

Based on the results of studying HGP development on the territory of Almaty city, the following types of HGP have been identified (Fig. 2): type 1 – associated with the movement of the mass of soil and water under the

influence of gravity and the energy of the water flow; type 2 – associated with the urban area underflooding.

On the territory of the city of Almaty and the areas of prospective development adjacent to it, there are two main zones for development of hazardous geological and engineering-geological processes. The first zone includes a group of HGP associated with the movement of the mass of soil and water under the influence of gravity and the energy of the water flow. This group includes: landslides, collapses, land subsidences, mudflows, land runoff and solifluction processes. Geographically, this zone is located in the southernmost foothill areas of the city and along the built-up river valleys. The second group of HGP is associated with the underflooding of the urban area and we referred it to the second zone of the development of these processes. Plots belonging to this zone are located in the northern plain part of the city to the north of Ryskulov Avenue.

#### **Landslides, landfalls and mudflow phenomena**

Significant development of these processes in the basins of the rivers Kaskelen, Aksay, Bolshaya and Malaya Almatinka. Along the streams Akzhar, Kokshukyr, Maljutinsky, Kyzylzhar, which are the centers of mudflows due to intensive precipitation, it led to significant changes in the structure of the valleys of these streams, with the activation of landslides, collapse, lateral and bottom erosion. Along the mudflow channel the overlapping debris roads, river beds, destroyed engineering communications were recorded. Areas exposed to HGP are also associated with the slope trimming during road construction, terracing slopes under large-scale construction on slopes located near Butakovka, Krasny Vostok, Mechet, Priroda, Alga, Arai, 1,5 km south-west of the village Kamenka and others. The location of the recorded landslide areas and the damage caused by them to buildings and engineering structures are shown in Table 1.

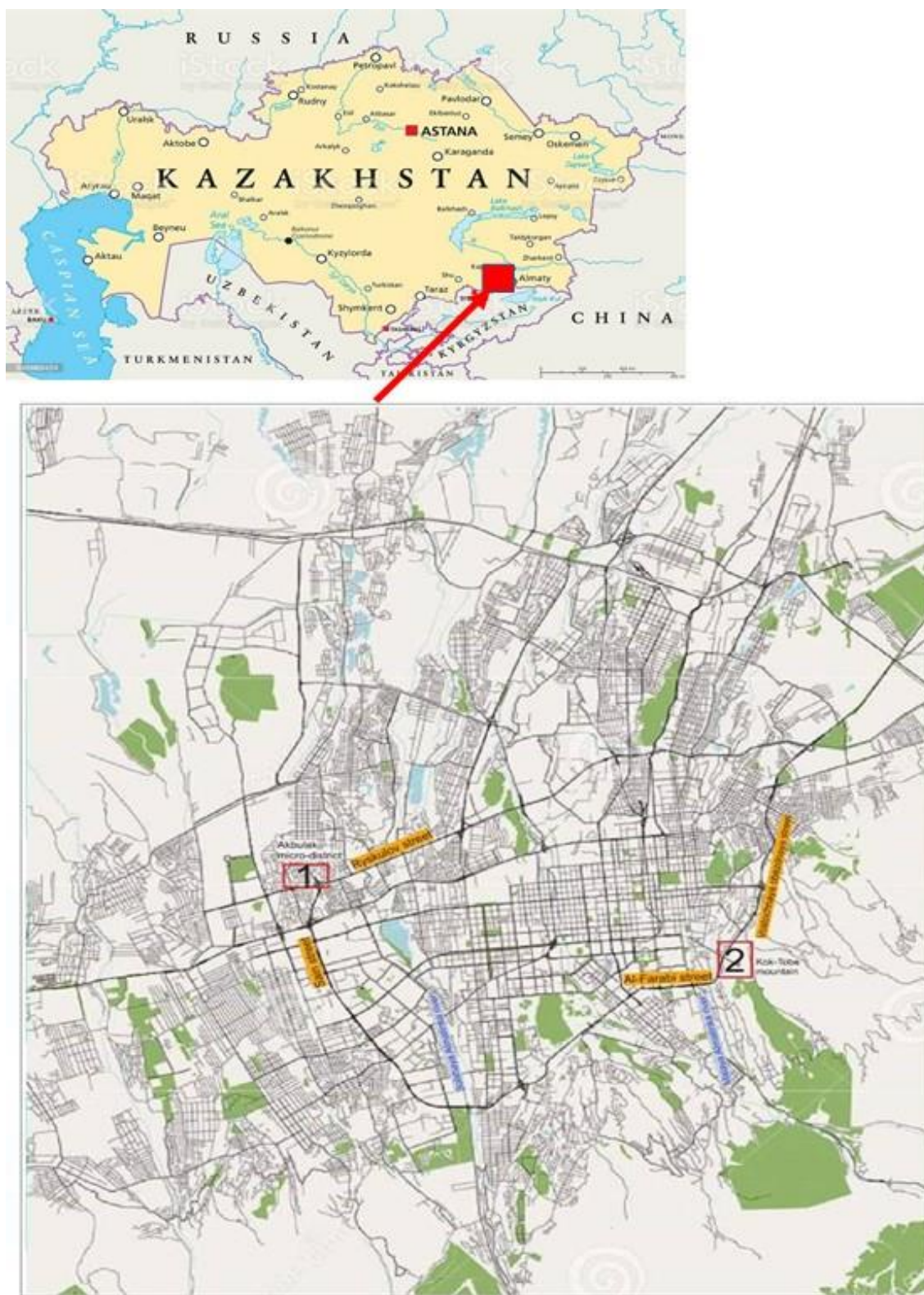
As an example for describing the development of landslide processes, we selected an experimental site located on northwestern slope of Kok-Tobe Mount, as the most dangerous, on which complete information was collected and work was carried out aimed at slope-strengthening this landslide (slope-strengthening work was carried out by JSC «Gidrospetsstroy»).

Landslide on the northwestern slope of Kok-Tobe Mount. The studied site is located in a low-mountainous part on the right bank of Malaya Almatinka River at elevations of 1054, 1102 m. Geomorphologically, the site is confined to the area of denudation of tectonic low-mountain relief. The shape of mountain structures is represented by smoothed watersheds and convex, steep slopes covered with dense herbaceous vegetation (Fig. 3).

Landslide is related to the domestic and storm water drainage problems, immediately after construction of the cable car and «Aul» restaurant on Kok-Tobe Mount. By the middle of 1980s, a landslide was formed here due to water leakage from pipes. The landslide descended into Solonovka river valley without causing any harm, except for a small flood. In 1998, due to a water leakage from the main water conduit laid along the northwestern slope of the mountain, a landslide-stream descended, consisting of

waterlogged masses of soil with a volume of 700–900 m<sup>3</sup>. The soil natural state was disturbed by the road and construction sites planning. In the second half of the 1990s, due to the increase in soil moisture, a breakaway

crack began to form and the soils of the northwestern slope began to slide slowly. Slope-strengthening work using bored piles was carried out in the period from 2002 to 2005 and stopped landslide formation (Fig. 4).



**Fig. 1.** Overview map and layouts of the studied sites on the Almaty city territory: 1 – underflooding; 2 – landslide

**Рис. 1.** Обзорная карта и карта экспериментальных участков на территории г. Алматы: 1 – процесс подтопления; 2 – оползневой процесс

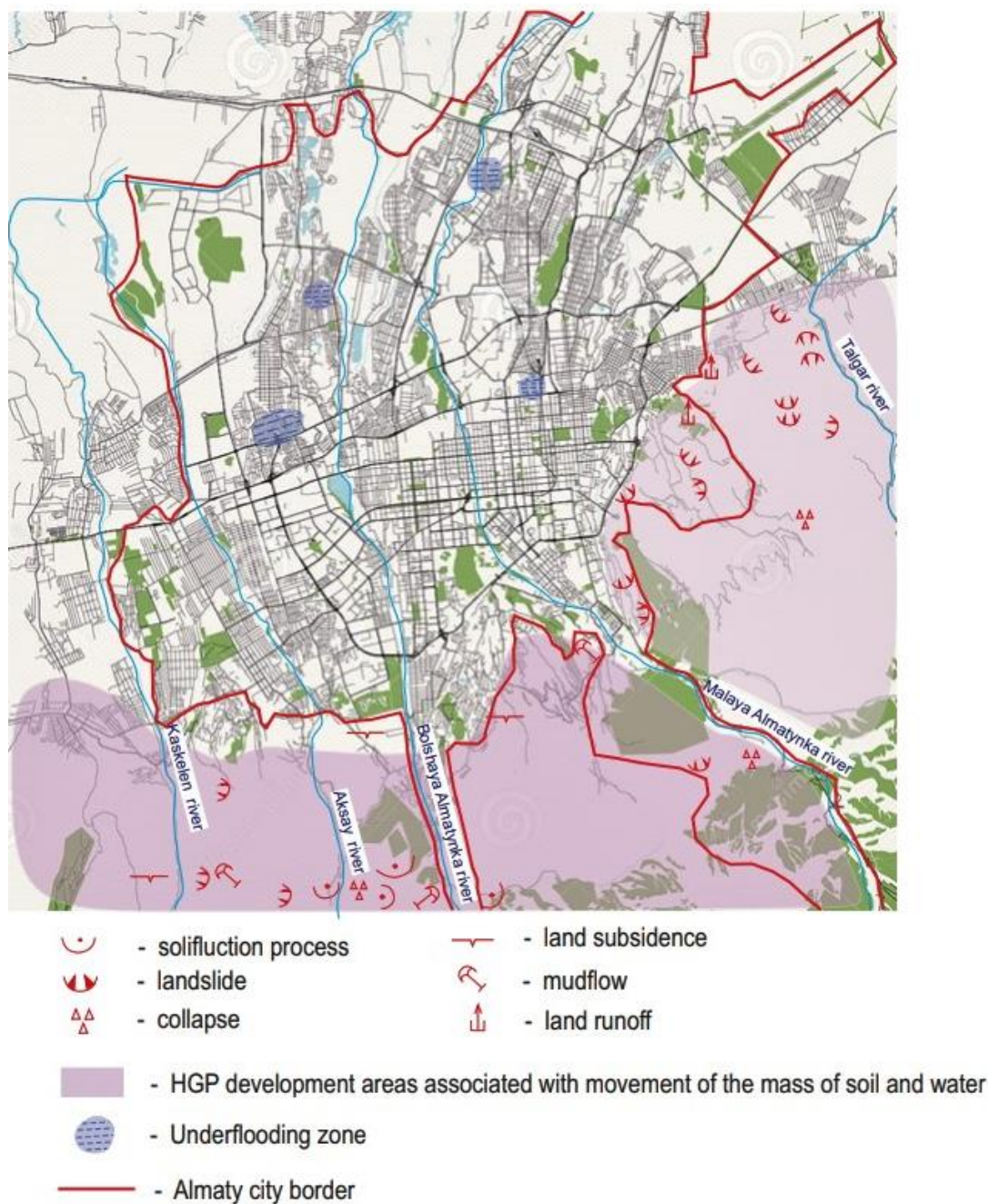


Fig. 2. Zoning map of Almaty city according development of HGP

Рис. 2. Карта районирования г. Алматы по развитию опасных геологических процессов

Soils composing the landslide slope, leveled watershed and near-watershed surfaces are lithologically represented by a two-layers stratum: upper layer represented by loess-like loam, macroporous, dense, slightly moist. And the underlay part of the soil profile is boulder-pebble with sandy-loamy filler. The physical and mechanical properties of the upper layer have the following values:

- Natural moisture 16,6–22,9 %
- Dry unit weight 1,19–1,33 g/cm<sup>3</sup>
- Porosity 50,9–55,4 %
- Plasticity index 8,9–11,9
- Subsidence capacity 0,01–0,034
- Natural cohesion 0,018–0,22 MPA
- Underwater cohesion 0,004–0,018 MPA

- Natural internal friction angle 25–29°
- Underwater internal friction angle 24–28°

Thus, along with geological, geomorphological, climatic conditions, the technogenic factors, such as overloading the slope, artificial waterlogging of soils, undercutting of slopes, are of great importance for HGP activation. All this reduces the slope stability and may lead to collapse of the cable car station, observation platforms, as well as houses located at the foot of Kok-Tobe Mount (Fig. 4).

The necessary parameters characterizing the landslide-prone area, which will be used in the further calculation of the slope stability, were entered into the documentary database of the landslide area.



**Table 1.** Location of the recorded landslide areas

**Таблица 1.** Расположение зафиксированных оползневых участков

HGP type Вид ОГП	Location Местоположение	HGP damage to buildings and engineering structures Повреждение объектов народного хозяйства за счет ОГП
Landslides Оползни	Кыргайлдinka river basin, middle reaches, road on the dacha «Gornyı sadovod» Бассейн р. Кыргайльдинка, среднее течение, дорога на даче «Горный садовод»	Road blockage/Завал дороги
	Кыргайлдinka river basin, Koklai sai tract Бассейн р. Кыргайльдинка, урочище Коклай сай	Road blockage/Завал дороги
Landslide and erosion Оползневые и эрозионные процессы	Electric substation site 131a Gornyı Gigant, on the crest of trampolines mountain Участок электроподстанции 131 а Горный гигант, на гребне горы трамплинов	Collapse of power transmission line supports, equipments Обрушение опор ЛЭП, оборудования
Landslide Оползень	Besagash township, AKNM micro-district, no 3 and 5 houses Посёлок Бесагаш, микрорайон АКНМ, дома № 3 и 5	Deformation and destruction of homes Деформация и разрушение домов
	Right side of Aksay river at the exit from mountains, in the area of 4 built cottages Правый борт р. Аксай на выходе из гор, в районе 4 построенных коттеджей	Homes destruction on the top and at the foot of the slope Разрушение домов на вершине и у подножья склона
	Remizovka river basin, Kotyrbulak dachas Бассейн р. Ремизовка, дачи Котурбулак	Homes destruction Разрушение дачных домов
	Kaskelen river, 1 km southern of the landslide dam, on the slope of northern exposure Река Каскелен, 1 км южнее селевой плотины, на склоне северной экспозиции	Destruction of houses, buildings Разрушение домов, строений
	Kaskelen river, 1 km western of the landslide dam, on the slope of southwestern exposure Река Каскелен, 1 км западнее селевой плотины, на склоне юго-западной экспозиции	Destruction of houses and country sites Разрушение дач, дачных участков



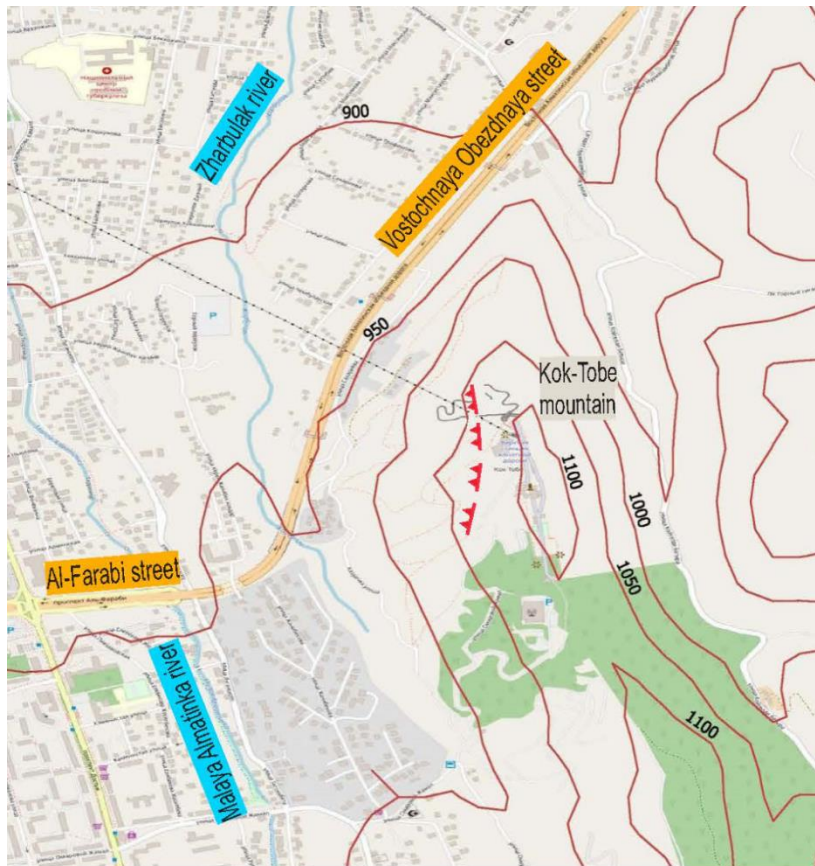
**Fig. 3.** Landslide on the northwestern slope of Kok-Tobe Mount. Photo is from «Monitoring of hazardous geological processes at Kaskelen-Talgar test site in 2017–2018»

**Рис. 3.** Оползень на г. Кок-Тобе. Фото взято из отчета «Ведение мониторинга опасных геологических процессов на Каскелен-Талгарском полигоне за 2017–2018 гг.»

#### Underflooding of certain sites in the northern part of Almaty city

Underflooding of the urban territory takes place on the foothill plain of Zailiyskiy Alatau [3]. The filling and planning of existing topographic lows and «karasu» rivers

[17], that decrease in natural drainage, leads to underflooding of buildings and other engineering structures. «Karasu» rivers are formed on the foothill plain in the groundwater discharge zones and have spring feeding, to which snow and rain precipitations are added [17, 18].



0 100 200 m  - landslide site

*Fig. 4. Layout of the experimental site 2 on the slope of Kok-Tobe Mount*

*Рис. 4. Карта экспериментального участка 2 на г. Кок-Тобе*



*Fig. 5. One of the «karasu» rivers in winter. Photo of A. Zhakyp, 2020*

*Fig. 5. Одна из рек карасу в зимнее время года. Фото сделано Жакып А., 2020*

Currently, these natural rainwater and groundwater drains in the north part of Almaty city are mostly filled up and planned and this process continues (Fig. 2). When the ravines are filling, a local increase in the level of groundwater is observed due to the decrease of their drainage conditions. Partial backfilling of ravines during construction of roads crossing them is accompanied by water dampening and formation of swampiness and underflooding (Fig. 5). The process of underflooding of the territory of the northern part of Almaty city was studying at the experimental site located north of Ryskulov Street (Fig. 1). The phenomenon of underflooding was most clearly developed on the territory of the Akbulak micro-district, when groundwater level rose to ground surface, and basements in nearby houses were flooded. This was the reason for choosing this area as an experimental site for a detailed description and assessment of the potential flooding of the territory of Almaty.

#### Description of «underflooding» experimental site and investigation methods

«Northern part of Almaty city» – the experimental site is located in the northwestern part of Almaty city, north

of Ryskulov Street, in Akbulak micro-district, along Yessenin and Armavirskaya streets (Fig. 6). Geomorphologically, the township is located on an alluvial-proluvial foothill plain. In lithological terms, the experimental site is confined to the Upper Quaternary alluvial-proluvial deposits (apQ<sub>III</sub>).

Water-bearing rocks in this area are represented by gravel-pebble and gravelly sands. Granulometric composition of gravel and pebbles: content of clay particles – 1,3 %; silty – 2,9 %; sandy – 39 %; gravel – 57,8 %. Soil density – 1,65 g/cm<sup>3</sup>; at maximum compaction – 1,8 g/cm<sup>3</sup>, natural angle of repose – 32°, underwater – 25°. The aggregate is medium-grained sand with the following particle size distribution: clay particles – 0,8 %; silty – 4,3 %; sandy – 59,1 %; gravel – 35,8 %; natural angle of repose of dry soil – 31°, underwater – 24°.

During the construction of the settlement, planning of the territory and backfilling of «karasu» rivers were carried out, which is the basis for drainage of groundwater and rainwater, especially in a high-water year.

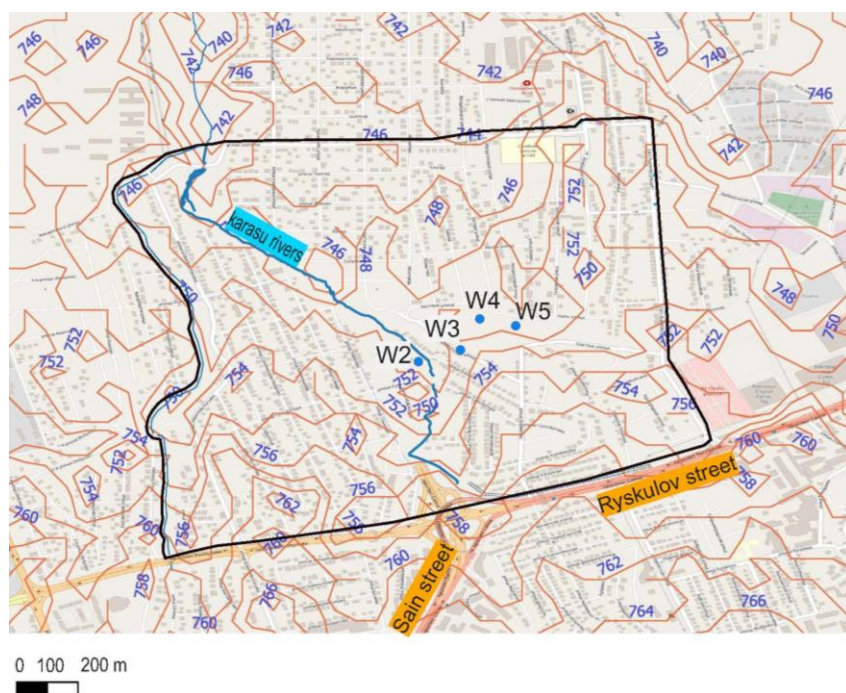


Fig. 6. Layout of the factual material of the Northern part of Almaty city experimental site, Akbulak micro-district: W2 – monitoring wells

Рис. 6. Карта фактического материала экспериментального участка в северной части г. Алматы, мкрн. Акбулак: W2 – наблюдательные скважины

This caused a rise in groundwater levels, and, as a result, underflooding of urban utility services communications and industrial and residential buildings. The processes of underflooding especially manifested in a high-water year, when, during the period of heavy rains, the monthly norm of precipitation fell per one day. A negative role in this process was also played by a large area of asphalted territories located hypsometrically south of Ryskulov Street, as well as the absence of storm

sewers necessary for the collection and outflow of rain and melt water. These wells are used for systematic monitoring of the influence of the groundwater level on the development of waterlogging and soil salinization.

Monitoring of underflooding process development was based on the data received from the observation post at the experimental site. One of the criteria for choosing these observation posts for monitoring was the degree of their impact on the vital population activity, buildings and

communications. At the same time, special attention was paid to the seasonal periods of groundwater fluctuations and periodic underflooding of the territory by groundwater. Monitoring of underflooding development included the following: observation of groundwater levels; condition of the river runoff; atmospheric precipitation; flood phenomena. The observation results compiled a documentary database of the experimental site for the study of the underflooding. In addition, this database includes: temporally data on the «karasu» river flow, set maps of the «karasu» rivers location from 1967 to present time; topographic plans of the Almaty city in 1967, 1995 and 2017; maps of the groundwater depth and hydrodynamic pressure of the upper soil layers. The condition of the river runoff and flood phenomena were monitored by means of visual observations after the occurrence of floods and heavy rainfalls. The groundwater levels depth was recorded according to the data of regular measurements in observation wells. The observation wells layout is shown in Fig. 6. Five wells, up to 15 m depth, were drilled on the site. The frequency of measurements was three times a month. At the same time, operational changes in the hydrogeological and hydrodynamic conditions of the territory, which determine the activity of flooding, were also monitored.

Assessment of potential underflooding of the territory was carried out based on the use of the potential underflooding criterion  $P$  [19]:

$$P = (h_e - \Delta h) / H_c, \quad (1)$$

where  $h_e$  is the groundwater level before flooding, determined according to engineering survey data, m;  $\Delta h = f(x, y, t, w_0)$  is the value of the possible (predicted) rise of groundwater for the estimated period of time, m (determined on the basis of filtration calculations in accordance with the «Recommendations for the forecast of underflooding of industrial sites with groundwater» (VNII VODGEO, 1976) [20];  $H_c$  is the critical level of underflooding with groundwater, from the ground surface, m. While  $P \leq 1$  and  $t_c \leq T_p$  ( $t_c$  is the period of time during which  $H_c = h_e - \Delta h$  occurs), the territory is potentially underflooded.

### Results and discussion

A significant rise in the groundwater level in April–May was found which is associated with periods of heavy rains and melting snow. In 2016, the (rainiest) high groundwater level remained until August. In wells no. 3, 4, groundwater was at ground level (Fig. 7). Cellars in nearby houses were flooded. It should be noted that 2016 was the most water-abundant year for the last 10-year observation period.

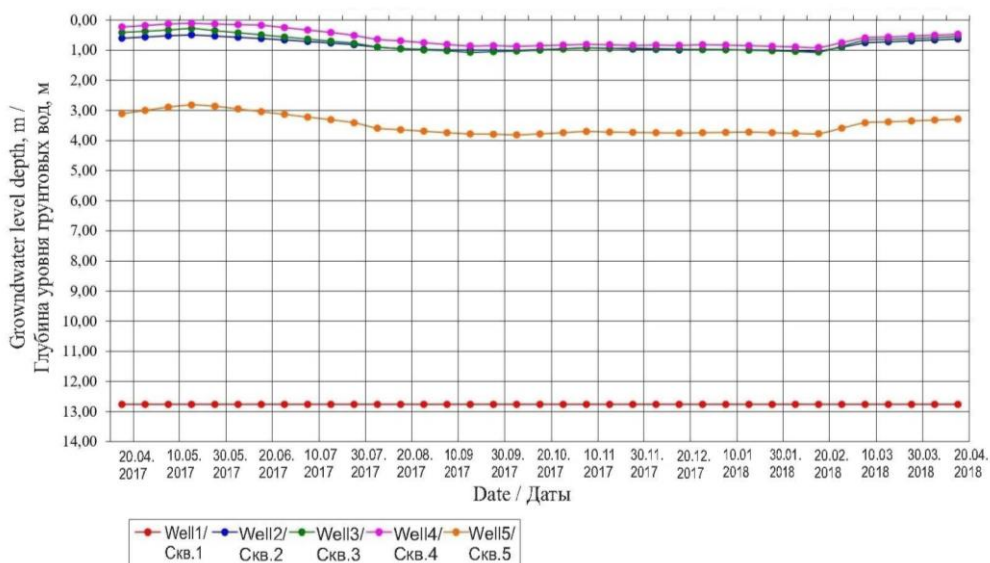


Fig. 7. Fluctuations in the groundwater level in 2017–2018. Monitoring post in Akbulak micro-district

Рис. 7. Колебания уровня грунтовых вод за 2017–2018 гг. Пост мониторинга в мкрн. Акбулак

From April 2017 to April 2018, the minimum values of the groundwater level were typical for the end of August – the beginning of September (Table 2). The observation results show that spring snowmelt and abnormal rains are the decisive factors for underflooding of this territory. The minimum depths of groundwater levels are recorded in wells 2–4.

Assessment of potential underflooding of the territory is shown in Table 3.

Based on the assessment performed, this territory belongs to the first degree in terms of potential underflooding.

Table 2. Groundwater level fluctuation

Таблица 2. Колебание уровня грунтовых вод

Well number Номер скважины	Groundwater rises levels (depth from ground surface) Уровни подъема грунтовых вод (глубина от поверхности земли)		Amplitude of groundwater level fluctuations Амплитуда колебания уровня грунтовых вод
	Maximum Максимальные	Minimum Минимальные	
	m/m		
2	0,49	1,04	0,55
3	0,28	1,04	0,76
4	0,11	0,91	0,80
5	2,82	3,81	0,99

**Table 3.** Assessment of potential underflooding of the territory

**Таблица 3.** Оценка потенциальной подтопляемости территории

Value names Наименование показателя	Symbol, unit of measure Условное обозначение, единица измерения	min миним.	average средн.	max макс.
Natural groundwater level Естественный уровень подземных вод	he, m/м	0,29	0,64	0,99
Critical underflooding level Критический уровень подтопления	Hc, m/м	1,50		
Natural conditions of the territory Природные условия территории	from 1 to 6, scheme от 1 до 6, схема	4		
Water consumption category Категория по водопотреблению	from A to D, group от А до Г, группа	D/Г		
Specific water consumption Удельный расход воды	m <sup>3</sup> /day per 1 ha м <sup>3</sup> /сут на 1 га	50–500		
Type of underflooding Тип подтопляемости	from I to IV, type от I до IV, тип	III		
Probable rate of level rise Вероятная скорость подъема уровня	in the first 10 years за первые 10 лет 10–15 years/лет 15–20 years/лет 20–25 years/лет	V, m/year/м/год	0,10 0,03 0,03 0,02	0,20 0,07 0,05 0,04
Estimated rise in groundwater level Расчетное повышение уровня подземных вод	in the first 10 years за первые 10 лет 10–15 years/лет 15–20 years/лет 20–25 years/лет	h=Vt, m/м	1,00 1,15 1,27 1,38	2,00 2,33 2,59 2,79
Underflooding criterion Критерий подтопляемости	in the first 10 years за первые 10 лет 10–15 years/лет 15–20 years/лет 20–25 years/лет	P=(he-Δh)/Hc	0,90	
Assessment of the territory for underflooding Оценка территории по подтопляемости	if P≤1, potentially underflooded при P≤1, потенциально подтопляемая	potentially underflooded потенциально подтопляемая		
Estimated period of underflooding of the territory Расчетный срок подтопления территории	tc=(he-Hc)/V, years/лет	4,3		
Degree of potential underflooding of the territory by the time of process development Степень потенциальной подтопляемости территории по времени проявления процесса	1 degree – up to 5 years/1 степень – до 5 лет 2 degree – up to 10 years/2 степень – до 10 лет 3 degree – up to 15 years/3 степень – до 15 лет 4 degree – up to 20 years/4 степень – до 20 лет 5 degree – up to 25 years/5 степень – до 25 лет	up to 5 years, degree до 5 лет, степень	1	
Classification criteria (P) for underflooding Критерий типизации (P) по подтопляемости	1 <sup>st</sup> degree, potentially underflooded territory 1-я степень, потенциально подтопляемая территория			

### Conclusions and recommendations

1. On the territory of Almaty urban agglomeration, the following main groups of HGP associated with certain areas were studied: 1 – landslides, landfalls, mudflow phenomena developing in the foothill regions; 2 – underflooding in the northern part of the town. Underflooding is related to the decrease in the natural drainage of the territory due to filling and planning of existing topographic lows and «karasu» rivers. Spring snowmelt and abnormal rains are also the important factors for underflooding of this territory.

2. Analysis of monitoring observations at the «underflooding» experimental site and assessment of potential underflooding of the territory carried out based on them, made it possible to classify this territory as the first degree in terms of potential underflooding. At the same time, underflooding estimated period of the territory will be from 4 to 5 years.

3. Taking into account the dynamics of underflooding in the northern part of the city, it is necessary to create a geo-filtration model for predictive assessment of development of underflooding of buildings and structures on this territory.

### REFERENCES

1. Zou L, Gui W. Simulation and prediction of geologic hazards and the impacts on homestay buildings in scenery spots through BIM. *PLOS ONE journal*, 2020, vol. 15 (9):e0238864 pp. 1–14.

2. Legget R.F. *Cities and Geology*. New York, Rev. McGraw-Hill Book Company, 1973. 559 p.

3. Liu Y., Wu L. High performance geological disaster recognition using deep learning. *Procedia Computer Science journal*, 2018, vol. 139, pp. 529–536.

4. Bovolenta R., Bianchi D. Geotechnical analysis and 3D Fem modelling of Ville San Pietro (Italy). *MDPI journal. Geosciences*, 2020, vol. 10 (473), pp. 1–25.

5. Nsengiyima J.B., Valentino R. Predicting landslide susceptibility and risks using GIS-based machine learning simulations, case of upper Nyabarongo catchment. *Geomatics, natural hazards and risk journal*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 1250–1277.
6. Orozco M.M., Caballero J.M., Nader A. Smart disaster prediction application using flood risk analytics. *EDP Sciences journal*, 2018, vol. 189, pp. 10006–10016.
7. Leng X., Liu D., Luo J., Mei Z. Research on a 3D geological disaster monitoring platform based on REST service. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, vol. 18, no. 7, pp. 226–244.
8. Kril T. Causes of some hazardous engineering-geological processes on urban territories. *E3S Web of Conferences 24: 3<sup>rd</sup> International Conference on Applied Geophysics*. France, Les Ulis, 2017. Vol. 9, no. 01009, 7 p.
9. Anker Y., Mirlas V., Gimburg A., Zilberbrand M., Nakonechny F., Meir I., Inbar M. Effect of rapid urbanization on Mediterranean karstic mountainous drainage basins. *Sustainable Cities and Society journal*, 2019, vol. 51, no. 101704101713, pp. 1–9.
10. Mustafayev S.T., Smolyar V.A., Burov B.V. *Opasnye geologicheskiye protsessy na territorii Yugo-Vostochnogo Kazakhstana* [Hazardous geological processes in the territory of South-East Kazakhstan]. Almaty, Gylym Publ., 2008. 183 p.
11. Salmenov Ye.Z., Borissov V.N. *Vedenie monitoringa opasnykh geologicheskikh protsessov na Kaskelen-Talgarskom poligone za 2017–2018 g.* Otchet TOO «Almatygidrogeologiya» [Monitoring of hazardous geological processes at Kaskelen-Talgar test site in 2017–2018. Report of the LTD «Almatyhydrogeology»]. Almaty, Almatyhydrogeology, 2018. 276 p.
12. Akhmedsafin U.M., Mirlas V.M., Shlygina V.F., Shestakov F.V. *Issledovaniya i prognoz rezhima urovney podzemnykh vod pod vozdeystviem antropogennykh faktorov na Almaatinskom bassejne dlya seley mikroseymsmorayonirovaniya.* Otchet Instituta gidrogeologii i gidrofiziki [Studies and forecast of the regime of groundwater levels under the influence of anthropogenic factors in Almaty basin for the purposes of microseismic zoning. Report of the Institute of Hydrogeology and Hydrophysics]. Alma-Ata, Academy of Sciences of the Kazakh SSR, 1974–1977. 301 p.
13. Sheko A.I., Krupoderov V.S. *Metodicheskie rekomendatsii po organizatsii i vedeniyu gosudarstvennogo monitoringa ekzogennykh geologicheskikh protsessov* [Methodological recommendations for organization and conduct of state monitoring of exogenous geological processes]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1997. 39 p.
14. Sheko A.I., Krupoderov V.S. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu spetsialnogo inzhenerno-geologicheskogo obsledovaniya i sostavleniya kart rayonov, potentsialno opasnykh i podverzhennykh opolznyam, obvalam i drugim ekzogennym geologicheskim protsessam* [Methodological recommendations for carrying out special subsurface exploration and drawing up maps of areas that are potentially hazardous and prone to landslides, landsfalls and other exogenous geological processes]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1979. 81 p.
15. Sheko A.I., Krupoderov V.S. *Metody dolgovremennykh regionalnykh prognozov ekzogennykh geologicheskikh protsessov* [Methods for long-term regional forecasts of exogenous geological processes]. Moscow, VSEGINGEO, Nedra Publ., 1984. 167 p.
16. Salmenov Ye.Z., Borissov V.N. *Provedenie inzhenerno-geologicheskikh rabot vdol gornoy chasti Zailiyskogo Alatau v rayone Talgara, Almaty, Kaskelena, podverzhennykh opasnym geologicheskim protsessam.* Otchet TOO «Almatygidrogeologiya» [Carrying out survey along the mountainous part of Zailiyskiy Alatau in the area of Talgar, Almaty, Kaskelen, subject to hazardous geological processes. Report of the LTD «Almatyhydrogeology»]. Almaty, Almatyhydrogeology, 2006. 277 p.
17. Akhmedsafin U.M., Shlygina V.F., Shestakov F.V., Mirlas V.M. *Formirovanie, prognoz, upravlenie rezhimom podzemnykh vod konusov vynosy (na primere predgornogo shleyfa Zailiyskogo Alatau)* [Formation, forecast, management of the groundwater regime of alluvial cones (based on the example of the alluvial piedmont plain of Zailiyskiy Alatau)]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1978. 153 p.
18. Akhmedsafin U.M., Shlygina V.F., Shestakov F.V., Mirlas V.M. *Iliiskiy artezianskiy basseyn* [Ili artesian basin]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1980. 146 p.
19. *Posobie po proektirovaniyu osnovaniy zdaniy i sooruzheniy (k SNiP 2.02.01-83)* [Guidance for design buildings and structures foundations (for SNiP 2.02.01-83)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 415 p.
20. *Rekomendatsii po prognozu podtopleniya promyshlennykh ploshchadok gruntovymi vodami* [Recommendations for the forecast of underflooding of industrial sites with groundwater]. Moscow, VNII VODGEO Publ., 1976. 324 p.

Received: 20 September 2021.

#### Information about the authors

**Altynay E. Zhakyp**, doctoral student, Satbayev University.

**Vladimir M. Mirlas**, Dr. Sc., researcher, Department of Chemical Engineering, Ariel University and Eastern Israel R&D Center.

**Yergali S. Auelkhan**, Cand. Sc., associate professor, Satbayev University.

УДК 624.131.1

## ОЦЕНКА ОПАСНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА АЛМАТЫ

Жакып Алтынай Елубайкызы<sup>1</sup>,  
a.zhakyp@stud.satbayev.university

Мирлас Владимир Моисеевич<sup>2</sup>,  
vladimirm@ariel.ac.il

Ауелхан Ергали Сатышевич<sup>1</sup>,  
y.auyelkhan@satbayev.university

<sup>1</sup> Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет им. К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а.

<sup>2</sup> Ариэльский Университет, Центр исследований и разработок Восточного Израиля, Израиль, 40700, г. Ариэль, ул. Рамат ХаГолан, 65.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью изучения опасных инженерно-геологических и гидрогеологических процессов, развивающихся на территории г. Алматы, представляющих угрозу жизнедеятельности населения, промышленному и гражданскому строительству, а также необходимостью оценки влияния хозяйственной деятельности человека на компоненты геологической среды.

**Цель:** описание и районирование территории алматинской агломерации по опасным геологическим процессам для выбора наиболее характерных участков для их детального изучения; обоснование выбора экспериментального участка для создания геофильтрационной модели, оценки развития процесса подтопления зданий и сооружений данной территории.

**Объекты:** оползни, обвалы, селевые явления, развивающиеся в предгорных районах; подъем уровня подземных вод в центральной части города на участках действующих водозаборов и подтопление отдельных районов в северной части города.

**Методы:** исследование и классификация развивающихся опасных геологических процессов в г. Алматы, систематизация и анализ основных факторов их возникновения и развития на территории по результатам ранее проведенных полевых исследований и опубликованных работ; полевые исследования и картографирование выбранного экспериментального участка; создание базы данных, включающей климатические, геологические, гидрологические, гидрогеологические данные; маршрутное обследование площадки, контроль уровня грунтовых вод в наблюдательных скважинах; наблюдение за состоянием речного стока и паводковыми явлениями.

**Результаты.** На территории алматинской городской агломерации выделено три основные группы опасных геологических процессов, приуроченных к определенным районам: 1 – оползни, обвалы, селевые явления, развивающиеся в предгорных районах города; 2 – подъем уровня подземных вод в центральной части города на участках действующих водозаборов; 3 – подтопление отдельных районов в северной части города. Подтопление участков в северной части города Алматы происходит вследствие уменьшения естественной дренированности территории за счет засыпки и планировки существующих понижений в рельефе и речек «карасу». Оценка потенциальной подтопляемости территории позволила отнести данную территорию к первой степени по потенциальной подтопляемости. При этом расчетный срок подтопления территории составит от 4 до 5 лет. Учитывая динамику процесса подтопления территории в северной части города, возникает необходимость создания геофильтрационной модели для прогнозной оценки развития процесса подтопления зданий и сооружений данной территории.

### Ключевые слова:

Опасные геологические процессы, городская территория, подтопление территории, подземные воды, мониторинг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zou L., Gui W. Simulation and prediction of geologic hazards and the impacts on homestay buildings in scenery spots through BIM // PLOS ONE journal. – 2020. – V. 15 (9):e0238864. – P. 1–14.
2. Legget. R.F. Cities and geology. – New York: Rev. McGraw-Hill Book Company, 1973. 559 p.
3. Liu Y., Wu L. High performance geological disaster recognition using deep learning // Procedia Computer Science journal. – 2018. – V. 139. – P. 529–536.
4. Bovolenta R., Bianchi D. Geotechnical analysis and 3D Fem modelling of Ville San Pietro (Italy) // MDPI journal. Geosciences. – 2020 – V. 10 (473). – P. 1–25.
5. Nsengiyvma J.B., Valentino R. Predicting landslide susceptibility and risks using GIS-based machine learning simulations, case of upper Nyabarongo catchment // Geomatics, natural hazards and risk journal. – 2020 – V. 11. – № 1. – P. 1250–1277.
6. Orozco M.M., Caballero J.M., Nader A. Smart disaster prediction application using flood risk analytics // EDP Sciences journal. – 2018. – V. 189. – P. 10006–10016.
7. Research on a 3D geological disaster monitoring platform based on REST service / X. Leng, D. Liu, J. Luo, Z. Mei // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2018. – V. 18. – № 7. – P. 226–244.
8. Kril T. Causes of some hazardous engineering-geological processes on urban territories // E3S Web of Conferences 24: 3rd International Conference on Applied Geophysics. – France, Les Ulis, 2017 – V. 9. – № 01009. – 7 p.
9. Effect of rapid urbanization on Mediterranean karstic mountainous drainage basins / Y. Anker, V. Mirlas, A. Gimburg, M. Zilberbrand, F. Nakonechny, I. Meir, M. Inbar // Sustainable Cities and Society journal. – 2019. – V. 51. – № 101704101713. – P. 1–9.
10. Мустафаев С.Т., Смоляр В.А., Буров Б.В. Опасные геологические процессы на территории Юго-Восточного Казахстана. – Алматы: Изд-во Гылым, 2008. – 183 с.
11. Сальменов Е.З., Борисов В.Н. Ведение мониторинга опасных геологических процессов на Каскелен-Талгарском полигоне за 2017–2018 гг.: отчет ТОО «Алматыгидрогеология». – Алматы: Алматыгидрогеология, 2018. – 276 с.

12. Исследования и прогноз режима уровней подземных вод под воздействием антропогенных факторов на Алмаатинском бассейне для целей микросейсмрайонирования: отчет Института гидрогеологии и гидрофизики / У.М. Ахмедсафин, В.М. Мирлас, В.Ф. Шлыгина, Ф.В. Шестаков. – Алма-Ата: АН КазССР, 1977. – 301 с.
13. Методические рекомендации по организации и ведению государственного мониторинга экзогенных геологических процессов / А.И. Шеко, В.С. Круподеров и др. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1997. – 39 с.
14. Методические рекомендации по проведению специального инженерно-геологического обследования и составления карт районов, потенциально опасных и подверженных оползням, обвалам и другим экзогенным геологическим процессам / А.И. Шеко, В.С. Круподеров и др. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1979. – 81 с.
15. Шеко А.И., Круподерова В.С. Методы долговременных региональных прогнозов экзогенных геологических процессов. – М.: ВСЕГИНГЕО, Недра, 1984. – 167 с.
16. Сальменов Е.З., Борисов В.Н. Проведение инженерно-геологических работ вдоль горной части Заилийского Алатау в районе Талгара, Алматы, Каскелена, подверженных опасным геологическим процессам: отчет ТОО «Алматыгидрогеология». – Алматы: Алматыгидрогеология, 2006. – 277 с.
17. Формирование, прогноз, управление режимом подземных вод конусов выноса (на примере предгорного шлейфа Заилийского Алатау / У.М. Ахмедсафин, В.Ф. Шлыгина, Ф.В. Шестаков, В.М. Мирлас. – Алма-Ата: Изд-во «Наука», 1978. – 153 с.
18. Илийский артезианский бассейн / У.М. Ахмедсафин, В.Ф. Шлыгина, Ф.В. Шестаков, В.М. Мирлас. – Алма-Ата: Изд-во «Наука», 1980. – 146 с.
19. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). – М.: Стройиздат, 1986. – 415 с.
20. Рекомендации по прогнозу подтопления промышленных площадок грунтовыми водами. – М.: Изд-во ВНИИ ВОДГЕО, 1976. – 324 с.

*Поступила 20.09.2021 г.*

#### **Информация об авторах**

**Жакып А.Е.**, докторант, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет им. К.И. Сатпаева.

**Мирлас В.М.**, доктор технических наук, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, гидрогеолог, Департамент химической инженерии, Ариэльский Университет.

**Ауелхан Е.С.**, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет им. К.И. Сатпаева.



УДК 551.462:551.463:551.464

## АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ ОХОТСКОГО МОРЯ

**Черных Денис Вячеславович<sup>1</sup>**,  
denis.chernykh.vl@gmail.com

**Саломатин Александр Сергеевич<sup>1</sup>**,  
salomatin@poi.dvo.ru

**Юсупов Владимир Исаакович<sup>2</sup>**,  
iouss@yandex.ru

**Шахова Наталья Евгеньевна<sup>1,3</sup>**,  
nataliafletcher@yahoo.com

**Космач Денис Алексеевич<sup>1</sup>**,  
den-kosmach@mail.ru

**Дударев Олег Викторович<sup>1</sup>**,  
dudarev@poi.dvo.ru

**Гершелис Елена Владимировна<sup>4</sup>**,  
elenapanova@tpu.ru

**Силионов Вячеслав Игоревич<sup>1</sup>**,  
truexenox@gmail.com

**Ананьев Роман Александрович<sup>5</sup>**,  
corer@mail.ru

**Гринько Андрей Алексеевич<sup>4</sup>**,  
grinko@tpu.ru

**Семилетов Игорь Петрович<sup>1,4</sup>**,  
ipsemiletov@alaska.edu

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева,  
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

<sup>2</sup> Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
Россия, 119333, г. Москва, Ленинский пр., 59.

<sup>3</sup> Институт экологии Высшей школы экономики,  
Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20.

<sup>4</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>5</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36.

**Актуальность.** Газовые факелы – области пузырьковой эманации природных газов из морского дна в водную толщу и атмосферу – обнаружены в Мировом океане на глубинах от десятков метров до нескольких километров. Прямые измерения проб газа, переносимого всплывающими пузырьками, показали, что в их составе содержится более 80 % метана – второго по значимости парникового газа. Атмосферная эмиссия метана за счет расконсервирования гидратов и других депозитов природных углеводородов может приобрести широкомасштабный характер и вызвать необратимые климатические изменения. Обнаружение газовых факелов в водной толще может являться первым признаком наличия газовых гидратов в осадке, поэтому определение количества метана, переносимого газовыми факелами в воду, мониторинг их временной изменчивости и выявление новых районов газовых факелов является актуальными задачами современной науки. Результаты проведенного исследования крайне важны для понимания процессов разгрузки пузырькового метана из шельфа-материкового склона Арктических и Субарктических морей. **Цель:** выполнить оценку количества метана, переносимого газовыми факелами с глубины 2220 м в воду, в период с 2012 по 2018 гг.; выявить связь между потоком метана из данной области и глубинными землетрясениями, произошедшими в Охотском море; по имеющимся акустическим данным оценить скорости глубоководных течений в районе обнаружения ГФ.

**Объекты:** газовые факелы.

**Методы.** Акустические наблюдения за газовыми факелами проводились с помощью комплекса, установленного на борту НИС «Академик М.А. Лаврентьев», основу которого составляют модернизированные судовые эхолоты Сарган-ЭМ, ELAC LAZ-72, гидролокаторы Сарган-ГМ и многоканальная система цифровой регистрации акустических сигналов. Оценка потока метана в воду проводилась с помощью методов, основанных на измерении профиля сечения обратного рассеяния звука на частотах выше резонансной частоты пузырьков, формирующих ГФ.

**Результаты.** В ходе 15 экспедиций в Охотском море в интервале глубин от 46 до 3330 м было зарегистрировано 1168 индивидуальных газовых факела. Для выявления закономерностей пространственного распределения газовых факелов был построен график зависимости их числа от глубины их обнаружения. На полученном графике выделяются пять локальных максимумов, приуроченных к особенностям рельефа и зоне стабильности газогидрата метана. Наиболее глубоководные из известных газовых факелов обнаружены в Охотском море на северном и восточном склонах Курильской котловины на глубинах 3330 и 2220 м соответственно. Данные газовые факелы отличались сильной временной изменчивостью, приуроченной к тектонической активности в данном регионе. В работе показано, что поток метана, выделяемого одним из газовых факелов, изменялся на три порядка в диапазоне от 5 ммоль/с до 5 моль/с. Основываясь на имеющихся акустических данных, была рассчитана скорость глубоководного течения в Курильской котловине в интервале глубин от 1100 до 2200 м, которая составила 7 см/с.

**Ключевые слова:**

Охотское море, акустические исследования, газовые факелы, метан, глубоководные течения, поток метана в воду.

### Введение

Газовые факелы (ГФ) – области пузырьковой эманации природных газов из морского дна в водную толщу и атмосферу – обнаружены повсеместно на глубинах от нескольких метров до 2 и более километров (рис. 1, а) [1–10]. Прямые измерения проб газа, переносимого всплывающими пузырьками, показали, что в

их составе содержится более 80 % второго по значимости парникового газа – метана ( $\text{CH}_4$ ), эмиссии которого за счет расконсервирования депозитов природных углеводородов (например, арктических или океанических газовых гидратов) могут приобрести широкомасштабный характер и вызвать необратимые климатические изменения [11–13].

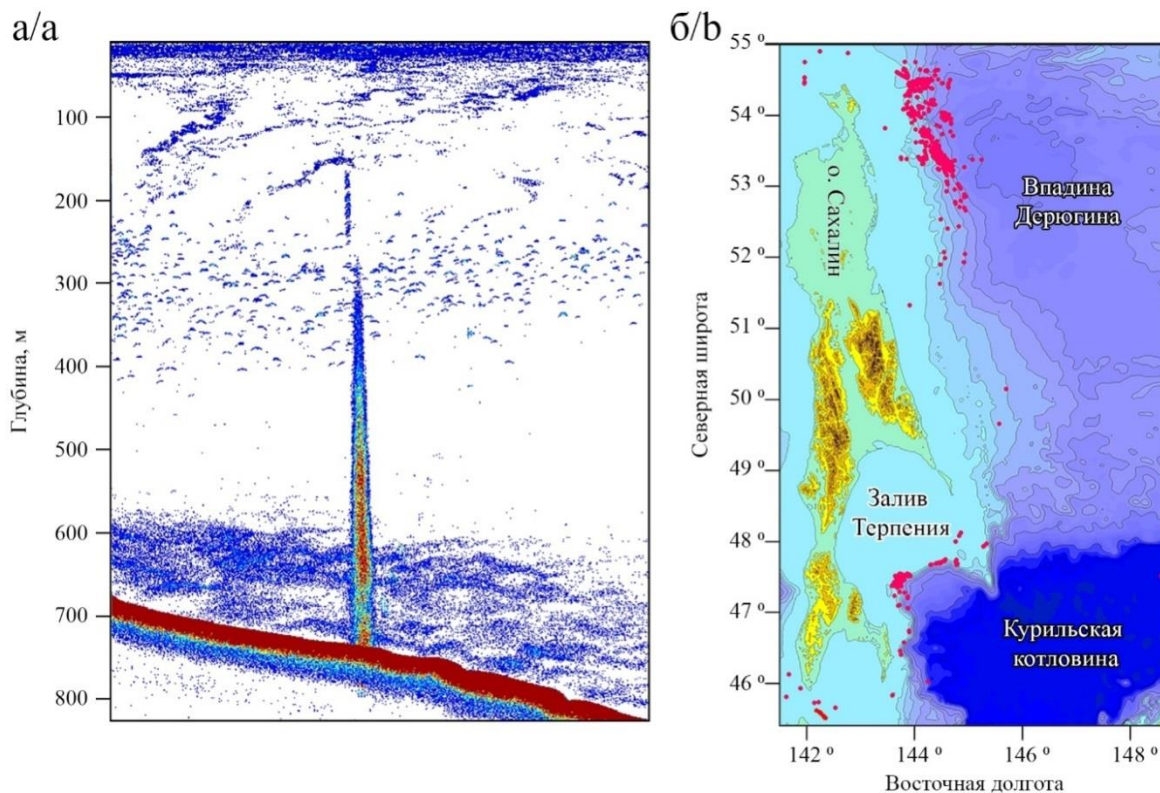


Рис. 1. Пример эхограммы газового факела (а); карта-схема положения газовых факелов, обнаруженных в Охотском море (красные точки)

Fig. 1. Example of gas flare echogram (a); map of the position of seeps detected in the Sea of Okhotsk (red dots)

$\text{CH}_4$  является вторым по значимости парниковым газом, содержание которого в атмосфере Земли неуклонно растет [14]. Возрастающий интерес к изучению данного компонента атмосферы объясняется тем, что радиационная активность  $\text{CH}_4$  значительно выше, а темпы увеличения его концентрации в атмосфере примерно в 2–4 раза быстрее, чем у двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) [15]. Последняя оценка вклада  $\text{CH}_4$  в современный потенциал глобального потепления, рассчитанная для ближайших 100 лет, показала, что ранние оценки недоучитывали климатическую роль  $\text{CH}_4$  примерно на 20–40 % [16–18]. Это значит, что суммарный радиационный форсинг от 1 кг  $\text{CH}_4$  превышает аналогичную величину для  $\text{CO}_2$  примерно в 35 раз, а не в 25, как было принято считать до недавнего времени [11]. Согласно палеоклиматическим данным, в результате роста температуры, сопровождающего смену климатических эпох, эмиссия  $\text{CH}_4$  и, соответственно, атмосферные концентрации увеличиваются примерно в 2 раза: от 0,3–0,4 ppb (холодные эпохи) до 0,6–0,7 ppb (теплые эпохи) [16].

Охотское море – одно из наиболее изученных субарктических морей, в котором на сегодняшний день

известно более 1000 ГФ, обнаруженных на глубинах от 40 до 3330 м (рис. 1, б). Акустические исследования ГФ в Охотском море начались в 1982 г. с обнаружения научно-исследовательским судном (НИС) «Геофизик» на глубине 800 м первого ГФ [10]. В настоящее время для поиска и оценки пространственно-временной и временной изменчивости ГФ используются как однолучевые [2, 4, 19–23], так и многолучевые эхолоты [19, 24–26], способные зарегистрировать одиночный всплывающий пузырек на глубинах до 3000 м [27]. ГФ, обнаруженные в Охотском море, приурочены к районам, содержащим в осадочном слое соединения клатратного типа – океанические газовые гидраты, рассматриваемые как потенциальный резерв углеводородного сырья [1, 20, 28, 29].

На сегодняшний день в Охотском море известно два района присутствия газогидратов в донных отложениях: северо-восточная часть континентального склона о. Сахалин (западный борт впадины Дерюгина) и Припарамуширский район Курильских островов (юго-восточный борт Гольгинского прогиба). Газовые гидраты в Охотском море выявлены на небольших поддонных глубинах, на северо-восточном саха-

линском склоне они отмечаются с поверхности морского дна [1, 28–30]. Как известно, присутствие газа в гидратном состоянии в непосредственной близости от морского дна возможно только при условии его постоянного поступления снизу [1, 31, 32]. Глубина в районе полей газогидратов, вблизи о. Сахалин и о. Парамушир, составляет от 385 до 1040 м, а температура у дна – в интервалах 2,2–2,3 и 1,7–2,2 °С, соответственно [20]. Зона стабильности газогидратов метана при таких термобарических условиях может простирается до поддонных глубин не менее 100 м [20]. Установлено, что большинство активных ГФ, связанных с областями скопления газовых гидратов, сосредоточены в основном в зонах, подверженных процессам тектонического сжатия. ГФ Охотского моря чаще всего встречаются в областях глубокого пригибания, в окраинных бассейнах и перед дугами в зонах субдукции [33].

В основу данной работы легли результаты исследований, полученные в 15 морских экспедициях в

Охотское море на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» с 2002 по 2018 гг. В работе представлены два самых глубоководных из известных ГФ, обнаруженные на глубине 3330 и 2220 м. Для ГФ, обнаруженного на глубине 2220 м, дана оценка потока метана, транспортированного им в воду, а также выявлена связь между потоком метана из данной области и глубинными землетрясениями, произошедшими в Охотском море. Благодаря многократной регистрации данного ГФ с высокой точностью была определена скорость глубоководного течения в данном районе.

#### Аппаратура и методика

Акустические наблюдения проводились с помощью комплекса, установленного на борту НИС «Академик М.А. Лаврентьев», основу которого составляют модернизированные судовые эхолоты Сарган-ЭМ, ELAC LAZ-72, гидролокаторы Сарган-ГМ и многоканальная система цифровой регистрации акустических сигналов (рис. 2).

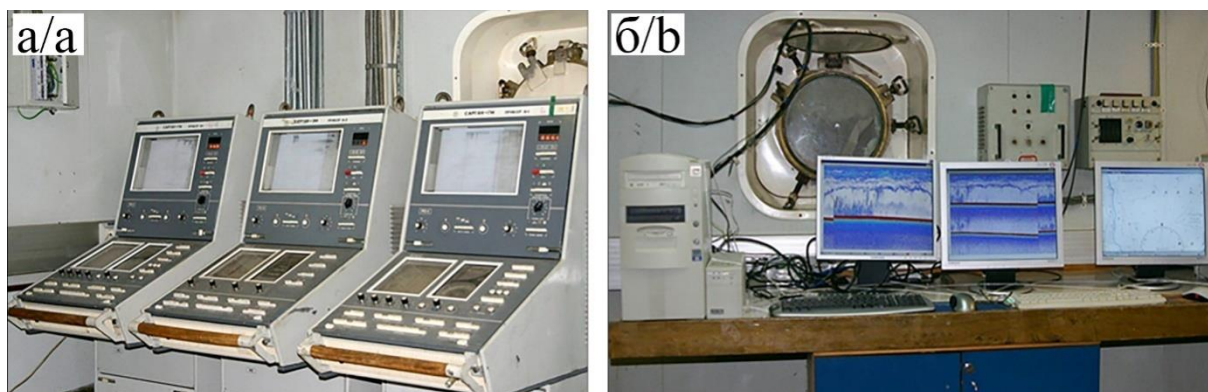


Рис. 2. Эхолот Сарган ЭМ и гидролокаторы Сарган-ГМ (а); многоканальная система цифровой регистрации акустических сигналов (б)

Fig. 2. Echosounder Sargan-EM and hydrolocators Sargan-GM (a); multichannel system of digital acoustic signals storage and recording (b)

Данный комплекс позволяет проводить одновременную регистрацию акустических сигналов по четырем независимым каналам на частотах 12, 20 (два канала) и 135 кГц. Одновременно с акустическими данными запи-

сываются точные координаты судна, полученные с помощью системы глобального позиционирования (GPS). Блок-схема комплекса представлена на рис. 3, а. В таблице приведены его основные параметры.

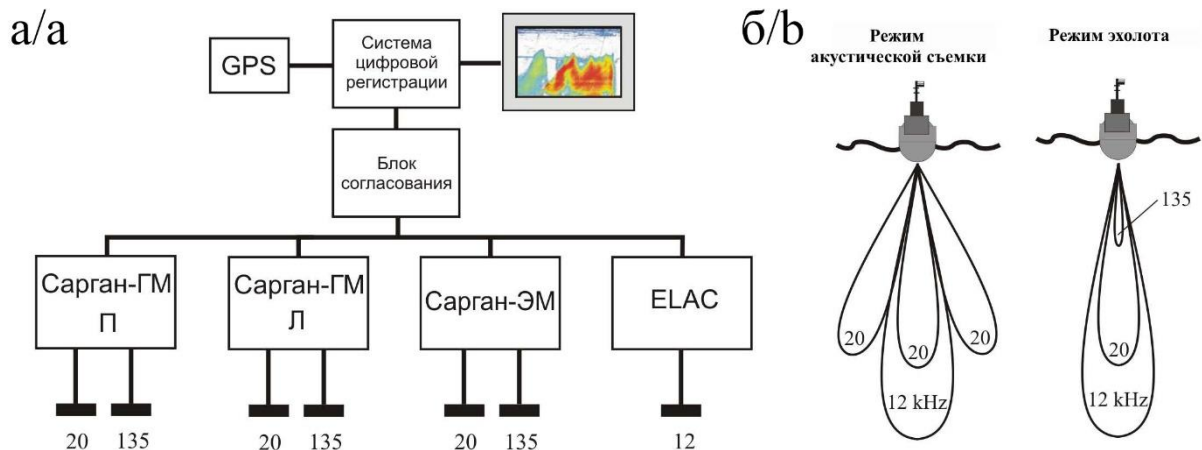


Рис. 3. Блок-схема акустического комплекса (а) и его конфигурация в разных режимах (б)

Fig. 3. Flow chart of acoustic complex (a) and its configuration in different modes (b)

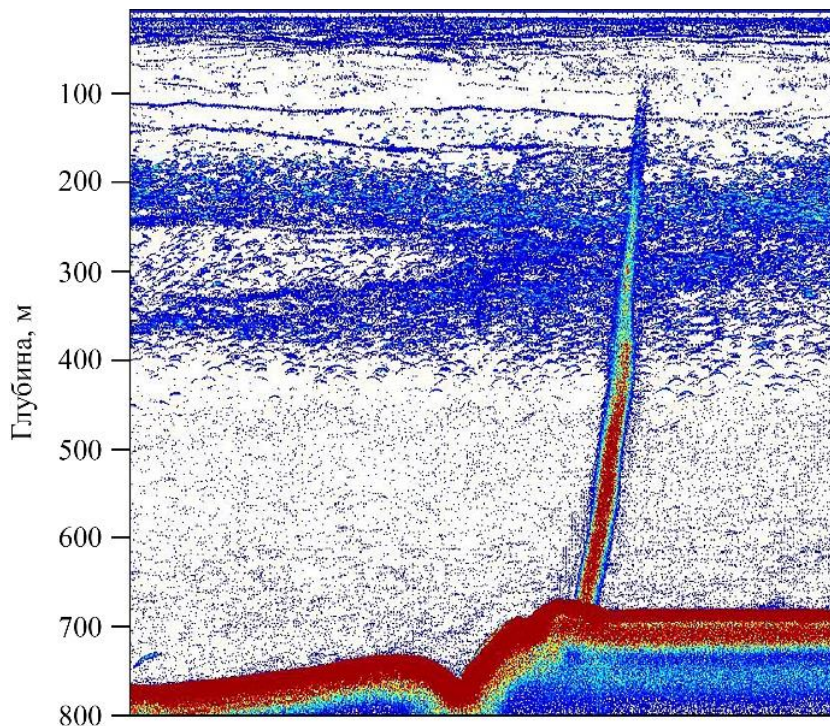
**Таблица.** Основные характеристики гидролокаторов  
**Table.** Basic characteristics of sonar

Название эхолота Echosounder name	ELAC	Сарган-ЭМ Sargan-EM	Сарган-ГМ Sargan-GM	
Рабочая частота, кГц Frequency, kHz	12,0	19,7	19,7	135,0
Полуширина диаграммы направленности, ° Half width of pattern, °	6,0	5,0	7,0	2,0
Импульсная мощность, кВт Power, kW	2,0	6,0	2,5	2,0
Длительность зондирующих импульсов, мс Impulse length, ms	0,8; 3,0; 10,0	0,5; 1,0; 3,0; 10,0	1,0; 3,0; 10,0; 30,0	0,16; 0,3; 1,0; 3,0

Гидроакустический комплекс позволяет проводить сбор акустической информации в двух основных режимах – походном и исследовательском. На полном ходу судна (9–12 узлов) применяется походный режим. Акустическое зондирование проводится в вертикальном направлении. Сбор информации происходит на частотах 12, 20 и 135 кГц на трех независимых

каналах (рис. 3, б). В заданных районах работ (полигонах) на малом ходу судна (3–6 узлов) применяется исследовательский режим. Эхолоты ELAC и Сарган-ЭМ (частоты 12 и 20 кГц) зондируют в вертикальном направлении, а гидролокаторы Сарган-ГМ (частота 20 кГц) наклонены под углами 30° к морскому дну в разные стороны (рис. 3, б). Подобная конфигурация акустического комплекса позволяет увеличить в три раза исследуемую площадь и получить наиболее детальную информацию об акустических неоднородностях в водном столбе и свойствах дна.

Сбор, первичная обработка и визуализация накопленной акустической информации осуществлялась с помощью многоканальной системы цифровой регистрации данных (рис. 2, б). Акустический аналоговый сигнал с помощью аналогово-цифрового преобразователя конвертируется в цифровой, далее проводится его синхронное детектирование и низкочастотная фильтрация. Визуализация собранных в реальном масштабе времени данных осуществляется в виде цветных эхограмм (рис. 4), причем каждый канал может отображаться одновременно на нескольких эхограммах с независимыми параметрами глубин и цветовой палитрой.



**Рис. 4** Пример отображения эхограмм программой «Sonic» в режиме акустической съемки  
**Fig. 4.** Example of display of echograms by the Sonic program in acoustic mapping

Разработанный комплекс позволяет проводить поиск и исследование ГФ и их источников, а также выделять особенности акустического рассеяния в верхней осадочной толще. Для получения количественной оценки потока метана, переносимого ГФ в воду, данный комплекс был откалиброван по методу кратных отражений акустического сигнала от морского дна [34]. В отличие от калибровки с помощью эталонной цели [19, 35], такая калибровка выполняется одним

человеком, не требует дополнительного оборудования и во многих случаях – дополнительного судового времени. Результатом калибровки являлось определение калибровочного коэффициента, связывающего между собой величину объемного обратного рассеяния с амплитудой полученного акустического сигнала.

ГФ на шельфе Охотского моря были обнаружены на глубинах от 46 до 3300 м (рис. 1, б), большая их часть глубоководные, обнаруженные на глубинах 200 и более

метров [8]. Вид таких ГФ на эхограмме определяется профилем течения, направлением движения судна и точностью, с которой судно прошло над источником ГФ. Для иллюстрации наиболее распространенных вариантов отображения глубоководных ГФ на эхограмме воспользуемся следующей эхолокационной моделью:

- Научно-исследовательское судно в момент регистрации ГФ должно двигаться с постоянной скоростью.
- Источники пузырьков на морском дне должны быть точечными (много меньше размера озвученной эхолотом зоны).
- ГФ должны иметь ярко выраженные границы, например, как на рис. 5, а.

- Скорость всплытия пузырьков ( $V_B$ ) в ГФ должна быть постоянной.
- Скорость течения  $V_T$  и его направление постоянные.
- Акустическое зондирование должно производиться в вертикальном направлении.

В таком случае всплывающие пузырьки выстраиваются в линию с углом наклона  $\alpha$ , который вычисляется по формуле:

$$\alpha = \arctg(V_T/V_B). \quad (1)$$

На рис. 5, б приведены рассчитанные по данной модели варианты отображения ГФ, обнаруженного на глубине 1000 м, при различных значениях угла пересечения ГФ с курсом судна и направлением течения  $\gamma$ .

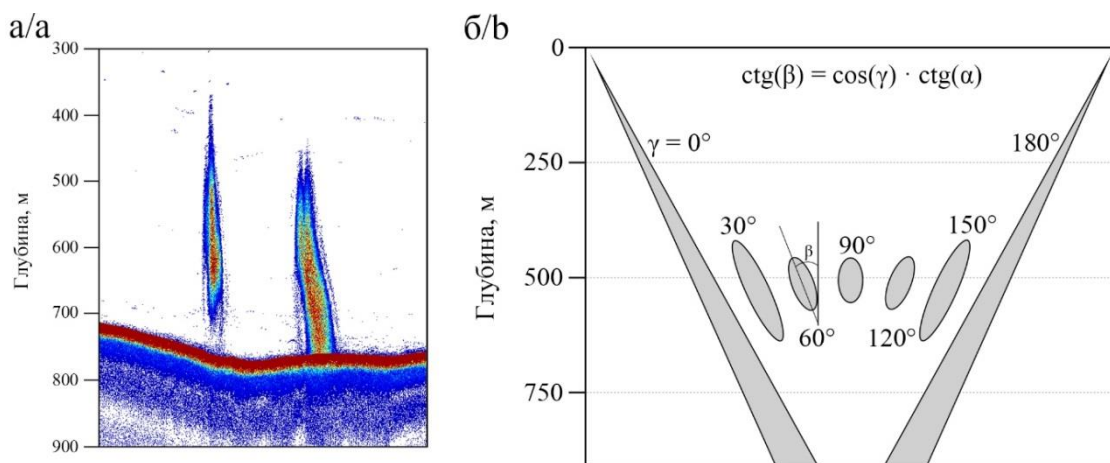


Рис. 5. Пример эхограммы газовых факелов, удовлетворяющих эхолокационной модели (а); модель отображение газового факела на эхограмме при его пересечении под разными углами к курсу судна и направлению течения  $\gamma$  (б)

Fig. 5. Example of gas flares echogram satisfying the echolocation model (a); the model displays the gas flare on the echogram when it intersects at different angles to the heading of the vessel and the direction of the current  $\gamma$  (b)

Из рис. 5, б следует, что форма ГФ на эхограмме существенным образом зависит от угла  $\gamma$ . Видимый угол наклона  $\beta$  оси ГФ изменяется от  $\alpha$  при движении судна вдоль факела до нуля при движении поперек его. Данная зависимость описывается выражением:

$$\text{ctg}(\beta) = \cos(\gamma) \cdot \text{ctg}(\alpha). \quad (2)$$

В случае движения судна вдоль течения ( $\gamma=0$  или  $\gamma=180$ ) ГФ прослеживается от морского дна до своей верхней точки, а видимый на эхограмме поперечный размер ГФ постепенно уменьшается от дна к поверхности. Такой случай дает полное представление о высоте ГФ и его внутренней структуре. Координаты ГФ с высокой точностью совпадают с координатами судна в момент обнаружения ГФ. Возможная ошибка в нахождении координат ГФ в основном определяется полушириной диаграммы направленности эхолота и глубиной. При движении судна вдоль течения видимый угол наклона оси ГФ  $\beta$  (рис. 5, б) совпадает с реальным углом наклона ГФ  $\alpha$ , что при известной скорости всплытия пузырьков позволяет определить скорость течения с помощью выражения (1).

При движении судна под прямым углом к течению ( $\gamma=90$ ) на эхограмме отображается только минимальная часть ГФ (рис. 5, б), глубина которой зависит от отношения скорости течения к скорости всплытия пу-

зырьков и расстояния между линией движения судна на дне и источником ГФ. Если ГФ не прослеживался до дна (рис. 6), то за координаты источника ГФ принимались координаты судна в момент пересечения ГФ. В этом случае возможная ошибка в нахождении координат ГФ увеличивается на расстояние между зарегистрированным ГФ и дном, умноженным на отношение скоростей течения и всплытия пузырьков.

Воспользовавшись выражением (1), рассчитаем реальный угол наклона ГФ и оценим расстояние от НИС до источника данного ГФ на морском дне. Ширина данного ГФ составляет 160 м и хорошо совпадает с рассчитанной по акустической модели шириной ГФ, зарегистрированного в водной толще (рис. 5, б). Видимый на эхограмме угол наклона ГФ  $\beta \approx 15^\circ$ , а угол между курсом судна и течением  $\gamma \approx 45^\circ$ . Реальный угол наклона ГФ ( $\alpha$ ) в интервале глубин 400–800 м, рассчитанный с помощью выражения (2), составляет  $20^\circ$ . Полагая, что скорость всплытия пузырьков 18 см/с [8], с помощью выражения (1) получим значение средней скорости течения в интервале глубин 400–800 м, равное 7 см/с. Если предположить, что глубоководное течение в данном районе Курильской котловины постоянно, то источник ГФ на морском дне находится на удалении в 800 м от места его регистрации в водном столбе.

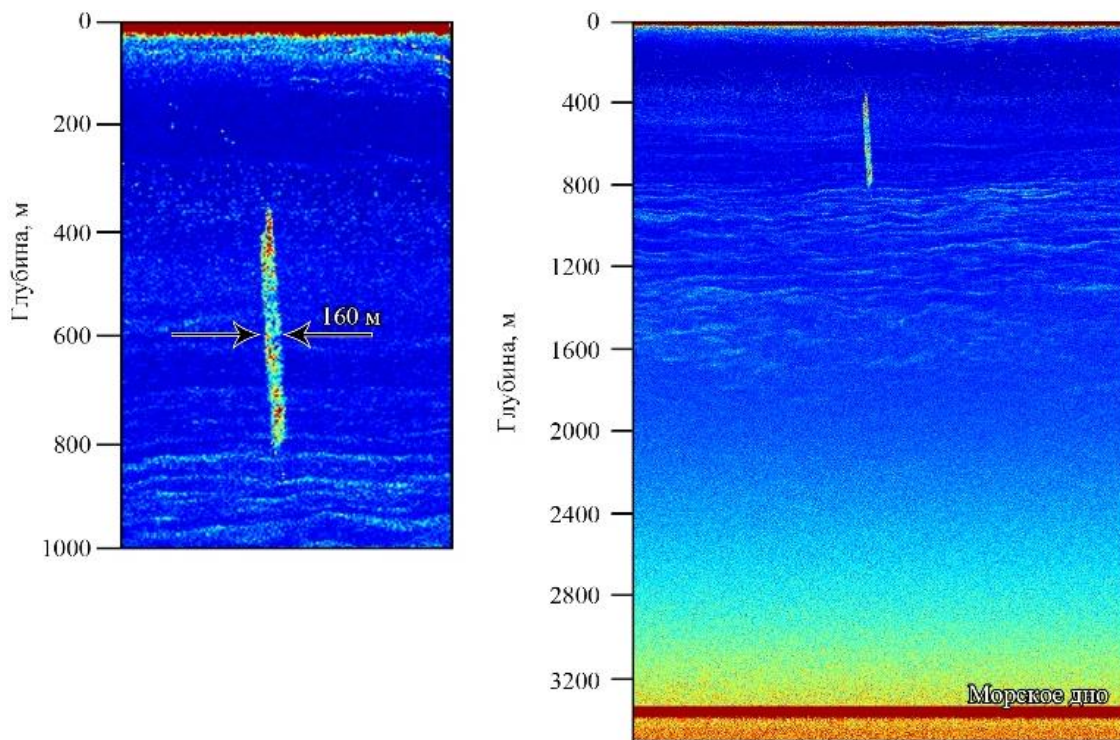


Рис. 6. Пример глубоководного газового факела (глубина дна 3330 м), зарегистрированного в водной толще под углом к течению  $\gamma=45^\circ$

Fig. 6. Sample of deep-sea gas flare (bottom depth 3330 m) at right angles to the current  $\gamma=45^\circ$

### Результаты

В 15 экспедициях на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в Охотском море было выполнено 1500 регистраций ГФ в интервале глубин от 46 до 3330 м (рис. 1, б). В том числе 116 ГФ были зарегистрированы многократно. Большинство обнаруженных ГФ (1168 ед.) расположено у северной оконечности о. Сахалин в интервале широт  $52-55^\circ$  с.ш., 957 из которых находятся в районе Дерюгинского осадочно-породного бассейна (рис. 1, б). Оставшиеся ГФ приурочены к южной оконечности о. Сахалин и проливу Лаперуза (рис. 1, б). Для выявления закономерностей пространственного распределения ГФ был построен график зависимости их числа от глубины их обнаружения (рис. 7, а). На полученном графике выделяются пять локальных макси-

мумов, первый из которых находится на глубине 175 м. Данный максимум приурочен к бровке континентального шельфа Охотского моря. Второй максимум, глубина 375 м, связан с нижней границей зоны стабильности газогидрата метана, сосредоточенного в осадках [1, 8, 20, 22, 29, 30, 36]. Третий находится на глубине 675 м и соответствует зоне перегиба континентального склона (рис. 1, б). Четвертый локальный максимум находится на глубине 975 м, его связь с особенностями рельефа дна или тектоникой плит не выявлена.

Последний из максимумов находится на глубине 1275 м. Из 35 ГФ, обнаруженных в этом интервале глубин, 34 находятся на небольшом участке морского дна площадью  $63 \text{ км}^2$  (рис. 7, б), на котором, предположительно, находится грязевой вулкан [37].

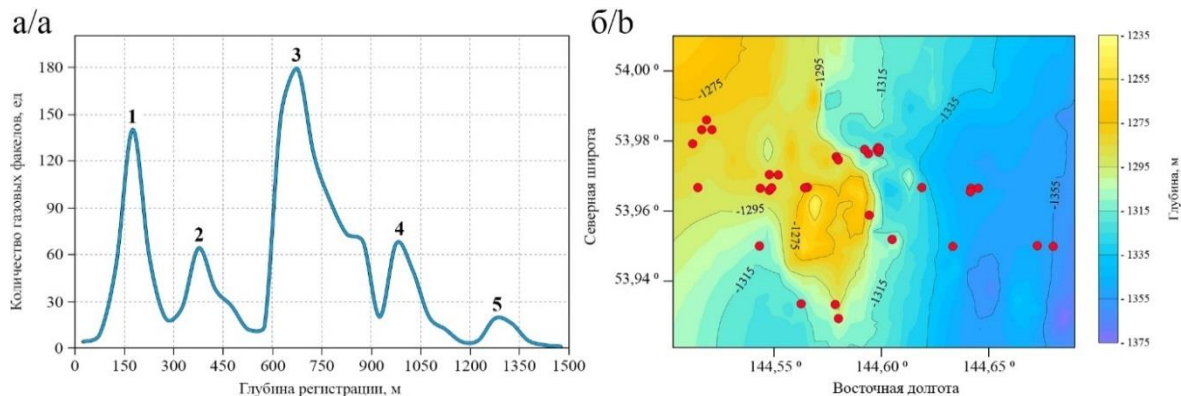


Рис. 7. График зависимости количества газовых факелов от глубины их обнаружения (а); батиметрическая карта предполагаемого грязевого вулкана с обнаруженными в данном районе газовыми факелами (красные точки) (б)

Fig. 7. Chart of the number of gas flares on depth its detections (a); bathymetric map of the supposed mud volcano, with seeps found at the area (red dots) (b)

Стоит выделить наиболее глубоководные из известных ГФ, обнаруженные в Курильской котловине на глубинах 3330 и 2220 м [38], соответственно. Глубоководный ГФ высотой около трех километров был зарегистрирован один раз на полном ходу судна при переходе между полигонами. Из-за наличия сильного глубоководного течения зарегистрировать удалось только его верхнюю часть (рис. 6). Второй глубоководный ГФ, высотой около двух километров (рис. 8), стабильно регистрировался в течение пяти лет.

Данный ГФ отличался сильной временной изменчивостью, поток метана, выделяемого им, менялся в диапазоне от 5 ммоль/с до 5 моль/с. Оценка потока метана в воду проводилась с помощью методов, основан-

ных на измерении профиля сечения обратного рассеяния звука на частотах выше резонансной частоты пузырьков, формирующих ГФ [8, 22]. При первой регистрации данного ГФ поток метана составил 50 ммоль/с (F1, рис. 8). При повторной регистрации (F2–F4, рис. 8), через пять часов после землетрясения магнитудой (Mw) 7,7 баллов, произошедшего северо-восточнее Поронайска [39], поток метана из данного ГФ возрос на 2 порядка и достиг 5 моль/с. Следует отметить, что сразу после глубоководного землетрясения поток выходящих пузырьков, формирующих данный ГФ, имел сильные пульсации с периодом 3,5 минуты. Подобные пульсации, со схожим периодом, наблюдались ранее у другого ГФ, обнаруженного на глубине 700 м [8].

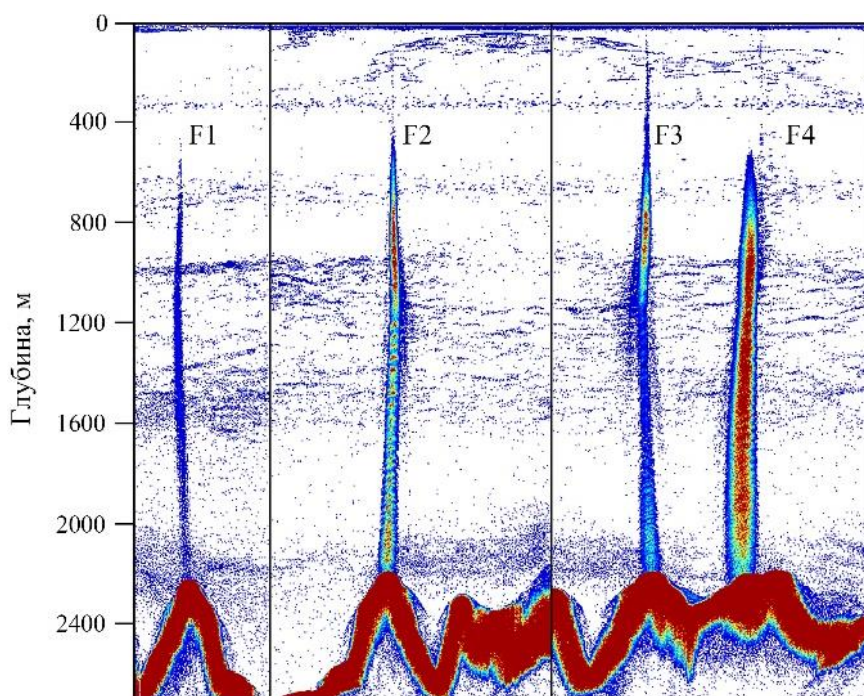


Рис. 8. Эхограммы глубоководного газового факела до (F1) и после землетрясения магнитудой 7,7 баллов (F2–F4)  
Fig. 8. Echograms of deep-sea gas flare till (F1) and after earthquakes of 7,7 points magnitude (F2–F4)

Наблюдения за данным ГФ в период с 2013 по 2016 гг. повторялись еще три раза. В 2013 г. регистрация ГФ была выполнена через 30 суток после глубоководного землетрясения с Mw=8,3 баллов и эпицентром, находящимся в Охотском море на глубине 630 км [39, 40]. Средний поток из данного ГФ в момент регистрации составил 1 моль/с. В 2014 и в 2016 гг. поток из данного ГФ ослаб на 3 порядка и составил около 5 ммоль/с.

Отметим, что на существование связи между рельефом, глубинами дна и расположением ГФ ранее обращалось внимание в работе [8], а отдельные наблюдения за месторасположением ГФ приведены в [41, 42]. В морях Восточной Арктики также были выявлены районы массивной разгрузки метана, которые были ассоциированы с районами высокой сейсмотектонической активности и аномально высокого геотермического потока тепла, который усиливает деградацию подводной мерзлоты и дестабилизацию гидратов снизу [11, 43–46].

#### Выводы

В 15 экспедициях на научно-исследовательском судне «Академик М.А. Лаврентьев» в Охотском море у берегов о. Сахалин в интервале глубин от 46 до 3330 м было зарегистрировано 1168 индивидуальных ГФ. Для выявления закономерностей пространственного распределения ГФ был построен график зависимости их числа от глубины их обнаружения (рис. 7, а). На полученном графике выделяются пять локальных максимумов, приуроченных к особенностям рельефа и зоне стабильности газогидрата метана.

Наиболее глубоководные ГФ обнаружены в Охотском море на северном и восточном склонах Курильской котловины на глубинах 3330 и 2220 м соответственно. Данные ГФ отличаются сильной временной изменчивостью, приуроченной к тектонической активности данного региона, вызывающей изменение интенсивности переносимого ими метана в виде всплывающих пузырьков. В работе показано, что поток метана, выделяемого одним из таких ГФ, изме-

нялся на три порядка в диапазоне от 5 ммоль/с до 5 моль/с. Более высокая пространственно-временная изменчивость потоков пузырькового метана из донных отложений в водную толщу была документирована только на шельфе морей Восточной Арктики, где дестабилизация гидратов связана с темпами и масштабами деградации подводной мерзлоты.

Данная работа является первым шагом в понимании причинно-следственных связей между разгрузкой метана в различных частях мега-разлома между Евразийской и Северо-Американской тектоническими плитами: в глубоководном Охотском море и мелководном шельфе морей Восточной Арктики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Conditions of gas hydrate formation in the Sea of Okhotsk / V.A. Akulichev, A.I. Obzhairov, R.B. Shakirov, E.V. Maltseva, A.I. Gresov, Y.A. Telegin // *Doklady Earth Sciences*. – 2014. – V. 454. – № 1. – P. 94–96.
2. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor / K. Andreassen, A. Hubbard, M. Winsborrow, H. Patton, S. Vadakkepulyambatta, A. Plaza-Faverola, E. Gudlaugsson, P. Serov, A. Deryabin, R. Mattingsdal, J. Mienert, S. Bunz // *Science*. – 2017. – V. 356. – № 6341. – P. 948–952.
3. 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability / J. Greinert, Y. Artemov, V. Egorov, M. De Batist, D. McGinnis // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2006. – V. 244. – № 1–2. – P. 1–15.
4. Methane seeps at the Hikurangi Margin, New Zealand / J. Greinert, J. Bialas, K. Lewis, E. Suess // *Marine Geology*. – 2010. – V. 272. – № 1–4. – P. 1–3.
5. Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: a review / R.H. James, P. Bousquet, I. Bussmann, M. Haeckel, R. Kipfer, I. Leifer, H. Niemann, I. Ostrovsky, J. Piskozub, G. Rehder, T. Treude, L. Vielstadte, J. Greinert // *Limnology and Oceanography*. – 2016. – V. 61. – P. S283–S299.
6. Leifer I., Patro R.K. The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: a review and sensitivity study // *Continental Shelf Research*. – 2002. – V. 22. – № 16. – P. 2409–2428.
7. A study of the gas seep Istok in the Selenga shoal using active acoustic, passive acoustic and optical methods / M. Makarov, S. Muyakshin, K. Kucher, I. Aslamov, N. Granin // *Journal of Great Lakes Research*. – 2020. – V. 46. – P. 95–101.
8. Salomatin A.S., Yusupov V.I. Acoustic Investigations of Gas «Flares» in the Sea of Okhotsk // *Oceanology*. – 2011. – V. 51. – № 5. – P. 857–865.
9. Methane transport and sources in an Arctic deep-water cold seep offshore NW Svalbard (Vestnesa Ridge, 79°N) / S. Sauer, W.-L. Hong, H. Yao, A. Lepland, M. Klug, F. Eichinger, T. Himmler, A. Crémière, G. Panieri, C. J. Schubert, J. Knies // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. – 2021. – V. 167. – P. 103430.
10. Авдейко Г.П., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В. «Вулканолог» исследует подводный факел (О геологических изысканиях научно-исследовательского судна в Тихом океане) // *Природа*. – 1986. – Т. 7. – С. 80–87.
11. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. – 2019. – V. 9. – P. 1–23.
12. Hovland M., Judd A., Burke R. The global flux of methane from shallow submarine sediments // *Chemosphere*. – 1993. – V. 26. – P. 559–578.
13. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic / E. Chuvilin, V. Ekimova, D. Davletshina, N. Sokolova, B. Bukhanov // *Geosciences*. – 2020. – V. 10. – № 10. URL: [https://www.researchgate.net/publication/344363803\\_Evidence\\_of\\_Gas\\_Emissions\\_from\\_Permafrost\\_in\\_the\\_Russian\\_Arctic](https://www.researchgate.net/publication/344363803_Evidence_of_Gas_Emissions_from_Permafrost_in_the_Russian_Arctic) (дата обращения 26.07.2021).
14. Statistical estimation of global surface temperature response to forcing under the assumption of temporal scaling / E. Myrsvoll-Nilsen, S.H. Sorbye, H.B. Fredriksen, H. Rue, M. Rypdal // *Earth Syst. Dynam.* – 2020. – V. 11. – № 2. – P. 329–345.
15. IPCC, 2001: climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J.E. Thornes, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White // *International Journal of Climatology*. – 2002. – V. 22. – № 10. – P. 1285–1286.
16. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/> (дата обращения 26.07.2021).
17. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the intergovernmental panel on climate change / O. Edenhofer, R.P. Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. Stechow // *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – 2011. – 1075 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/> (дата обращения 26.07.2021).
18. Improved attribution of climate forcing to emissions / D. Shindell, G. Faluvegi, D. Koch, G. Schmidt, N. Unger, S. Bauer // *Science*. – 2009. – V. 326. – P. 716–718.
19. Sonar estimation of methane bubble flux from thawing subsea permafrost: A case study from the Laptev sea shelf / D. Chernykh, V. Yusupov, A. Salomatin, D. Kosmach, N. Shakhova, E. Gershelis, A. Konstantinov, A. Grinko, E. Chuvilin, O. Dudarev, A. Koshurnikov, I. Semiletov // *Geosciences*. – 2020. – V. 10. – № 10. – P. 1–14.
20. Gas hydrates from the continental slope, offshore Sakhalin Island, Okhotsk Sea / G.D. Ginsburg, V.A. Soloviev, R.E. Cranston, T.D. Lorenson, K.A. Kvenvolden // *Geo-Marine Letters*. – 1993. – V. 13. – № 1. – P. 41–48.
21. Estimation of methane fluxes from bottom sediments of Lake Baikal / N. Granin, S. Muyakshin, M. Makarov, K. Kucher, I. Aslamov, L. Granina, I. Mizandrontsev // *Geo-Marine Letters*. – 2012. – V. 32. – P. 427–436.
22. An acoustic estimate of methane bubble release in regions of methane bubble release / A. S. Salomatin, V.I. Yusupov, O.F. Vereshchagina, D.V. Chernykh // *Acoustical Physics*. – 2014. – V. 60. – № 6. – P. 671–677.
23. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using splitbeam echosounders: Examples from the Arctic offshore NW-Svalbard / M. Veloso, J. Greinert, Mienert J., De Batist M. // *Limnology and Oceanography-Methods*. – 2015. – V. 13. – № 6. – P. 267–287.
24. Sonar gas flux estimation by bubble insonification: application to methane bubble flux from seep areas in the outer Laptev Sea / I. Leifer, D. Chernykh, N. Shakhova, I. Semiletov // *Cryosphere*. – 2017. – V. 11. – № 3. – P. 1333–1350.
25. Improved detection and mapping of deepwater hydrocarbon seeps: optimizing multibeam echosounder seafloor backscatter acquisition and processing techniques / G.A. Mitchell, D.L. Orange, J.J. Gharib, P. Kennedy // *Marine Geophysical Research*. – 2018. – V. 39. – № 1–2. – P. 323–347.
26. Urban P., Köser K., Greinert J. Processing of multibeam water column image data for automated bubble/seep detection and



- repeated mapping // *Limnology and Oceanography: Methods*. – 2017. – V. 15. – № 1. – P. 1–21.
27. Amount and fate of gas and oil discharged at 3400 m water depth from a natural seep site in the Southern Gulf of Mexico / M. Römer, C.-W. Hsu, M. Loher, I. Macdonald, C. Ferreira, T. Pape, S. Mau, G. Bohrmann, H. Sahling // *Frontiers in Marine Science*. – 2019. – V. 6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/337300257\\_Amount\\_and\\_Fate\\_of\\_Gas\\_and\\_Oil\\_Discharged\\_at\\_3400\\_m\\_Water\\_Depth\\_From\\_a\\_Natural\\_Seep\\_Site\\_in\\_the\\_Southern\\_Gulf\\_of\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/337300257_Amount_and_Fate_of_Gas_and_Oil_Discharged_at_3400_m_Water_Depth_From_a_Natural_Seep_Site_in_the_Southern_Gulf_of_Mexico) (дата обращения 26.07.2021).
28. Kasatkin S.A., Obzhairov A.I. Fluid-controlling significance of the Nosappu fracture zone and conditions for the formation of methane fluxes and gas hydrates (Sea of Okhotsk region) // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2018. – V. 12. – № 1. – P. 57–62.
29. New data on lineament control of modern centers of methane degassing in East Asian seas / R.B. Shakhov, A.I. Obzhairov, A.S. Salomatin, M.M. Makarov // *Doklady Earth Sciences*. – 2017. – V. 477. – № 1. – P. 1287–1290.
30. The stability of gas hydrate field in the northeastern continental slope of Sakhalin Island, Sea of Okhotsk, as inferred from analysis of heat flow data and its implications for slope failures / Y.G. Kim, S.M. Lee, Y.K. Jin., B. Baranov, A. Obzhairov, A. Salomatin, H. Shoji // *Marine and Petroleum Geology*. – 2013. – V. 45. – P. 198–207.
31. Gas flows in the Sea of Okhotsk resulting from Cretaceous-Cenozoic Tectonomagmatic activity / A.I. Obzhairov, T.A. Emelyanova, Y.A. Telegin, R.B. Shakhov // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2020. – V. 14. – № 2. – P. 156–168.
32. Matveeva T., Solov'ev V.A. Gas hydrates in Sea of Okhotsk: Regularities in formation and distribution // *Lithology and Mineral Resources* – 2003. – V. 47. – P. 101–112.
33. Modern biogenic gas-generated craters (sea-floor «pockmarks») on the Bering Shelf, Alaska / N.C. Hans, D.R. Thor, M.W. Sandstrom, K.A. Kvenvolden // *GSA Bulletin*. – 1979. – V. 90. – № 12. – P. 1144–1152.
34. Воловов И.В. Отражение звука от дна океана – М.: Наука, 1993. – 272 с.
35. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux / E. Weidner, T.C. Weber, L. Mayer, M. Jakobsson, D. Chernykh, I. Semiletov // *Continental Shelf Research*. – 2019. – V. 173. – P. 104–115.
36. Forecast of gas hydrates distribution zones in the Arctic Ocean and adjacent offshore areas / V. Bogoyavlensky, A. Kishankov, A. Yanchevskaya, I. Bogoyavlensky // *Geosciences*. – 2018. – V. 8. – № 12. – P. 1–17.
37. Operation report of Sakhalin slope gas hydrate project 2007, R/V «Akademik M.A. Lavrentyev» Cruise 43. – Kitami, Japan: Kitami Institute of Technology 2008. – 39 p.
38. Obzhairov A.I., Sokolova N.L., Telegin Y.A. Geological conditions of the formation and dissociation of gas hydrates in the Sea of Okhotsk: tectonic and genetic aspects // *Lithology and mineral resources*. – 2021. – V. 56. – № 4. – P. 333–342.
39. The earthquake hazards program website is moving // Docslide. 2021. URL: <https://earthquake.usgs.gov> (дата обращения 23.02.2021).
40. Глубокое охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. С магнитудой  $M_w=8,3$  – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений / В.Н. Чебров, Ю.А. Кугаенко, С.А. Видулина, Н.М. Кравченко, Е.А. Матвеев, С.В. Митюшкина, А.А. Раевская, В.А. Салтыков, Д.В. Чебров, А.В. Ландер // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. – 2013. – Т. 21. – С. 17–24.
41. Kutas R.I., Paliy S.I., Rusakov O.M. Deep faults, heat flow and gas leakage in the northern Black Sea // *Geo-Marine Lett.* – 2004. – V. 24. – P. 163–168.
42. Temporal variations in geophysical fields and earthquake forecasting issues / V.A. Parovyshny, V.N. Senachin, O.V. Veselov, E.V. Kochergin // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2015. – V. 6. – № 1. – P. 63–76.
43. Shakhova N.E., Alexeev V.A., Semiletov I.P. Predicted methane emission on the East Siberian Shelf // *Doklady Earth Sciences*. – 2010. – V. 4230 (2). – P. 261–264.
44. Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. The contribution of the East Siberian shelf to the modern methane cycle // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 2009. – V. 79. – № 3. – P. 237–246.
45. Shakhova N.E., Nicolsky D., Semiletov I.P. Current state of subsea permafrost on the East Siberian Shelf: Tests of modeling results based on field observations // *Transactions of Russian Academy of Sciences*. – 2009. – V. 429 (2). – P. 1518–1521.
46. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice / N. Shakhova, I. Semiletov, V. Sergienko, L. Lobkovsky, V. Yusupov, A. Salyuk, A. Salomatin, D. Chernykh, D. Kosmach, G. Panteleev, D. Nicolsky, V. Samarkin, S. Joye, A. Charkin, O. Dudarev, A. Meluzov, Ö. Gustafsson // *Philosophical Transactions Royal Society A*. – 2015. – 373. – 20140451.

Поступила 04.08.2021 г.

#### Информация об авторах

**Черных Д.В.**, кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории акустической океанографии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева.

**Саломатин А.С.**, кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией акустической океанографии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева.

**Юсупов В.И.**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории лазерной химии Института фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

**Шахова Н.Е.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева; главный научный сотрудник Института экологии Высшей школы экономики.

**Космач Д.А.**, научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева.

**Дударев О.В.**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева.

**Гершелис Е.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии, Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Силионов В.И.**, ведущий инженер Лаборатории акустической океанографии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева.

**Ананьев Р.А.**, научный сотрудник Лаборатории сейсмостратиграфии Института океанологии им. П.П. Шишова РАН.

**Гринько А.А.**, кандидат химических наук, инженер, Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Семилетов И.П.**, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий Лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева; научный руководитель Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.462:551.463:551.464

## ACOUSTIC INVESTIGATIONS OF THE DEEPEST METHANE SEEPS IN THE OKHOTSK SEA

**Denis V. Chernykh<sup>1</sup>,**  
denis.chernykh.vl@gmail.com

**Alexander S. Salomatin<sup>1</sup>,**  
salomatin@poi.dvo.ru

**Vladimir I. Yusupov<sup>2</sup>,**  
iouss@yandex.ru

**Natalia E. Shakhova<sup>1,3</sup>,**  
nataliafletcher@yahoo.com

**Denis A. Kosmach<sup>1</sup>,**  
den-kosmach@mail.ru

**Oleg V. Dudarev<sup>1</sup>,**  
dudarev@poi.dvo.ru

**Elena V. Gershelis<sup>4</sup>,**  
elenapanova@tpu.ru

**Vyacheslav I. Silionov<sup>1</sup>,**  
truexenox@gmail.com

**Roman A. Ananiev<sup>5</sup>,**  
corer@mail.ru

**Andrey A. Grinko<sup>4</sup>,**  
grinko@tpu.ru

**Igor P. Semiletov<sup>1,4</sup>,**  
ipsemiletov@gmail.com

<sup>1</sup> Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute,  
43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041.

<sup>2</sup> Russian Academy of Sciences Institute of Photon Technologies,  
Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics»,  
59, Leninskiy avenue, Moscow, 119333, Russia.

<sup>3</sup> Higher School of Economics,  
20, Myasnitsky street, Moscow, 101100, Russia.

<sup>4</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>5</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nahimovskiy avenue, Moscow, 117997, Russia.

**The relevance.** Seeps – areas of bubble emanation of natural gases from the seabed into the water column and the atmosphere – were found in different World Ocean locations at depths from tens meters to several kilometers. Direct measurements of gas samples carried by rising bubbles have shown that they contain more than 80 % of the second most important greenhouse gas – methane. The emissions of which, due to the re-preservation of deposits of natural hydrocarbons (for example, arctic or oceanic gas hydrates), can acquire a large-scale character and cause irreversible climatic changes. Detection of seeps in the water column may be the first indication of the presence of gas hydrates in the sediment. Therefore, assessment of the methane fluxes carried by seeps into the water column, detection of their variability, and identification of new regions of seepage are in the forefront of the marine and climate-related sciences. Moreover, understanding of deep seepage mechanism from disturbed gas hydrates observed in the Sea of Okhotsk is crucially important for study of methane ebullition from the shelf slope hydrates in the East Siberian Arctic seas – source of atmospheric methane of global significance.

**The main aim:** to assess the quantity of methane transported by methane seeps from a depth of 2220 m into the water for the period from 2012 to 2018; to identify the relationship between the flux of methane from this area and deep earthquakes that occurred in the Sea of Okhotsk; based on the available acoustic data, estimate the speed of deep-water currents in the seepage areas.

**Objects:** seeps, which forms hot spots of anomalously high dissolved methane concentrations in the water column-atmosphere.

**Methods.** Acoustic observations of the seeps were carried out using a complex unit installed on board of the RV «Academic M.A. Lavrentiev», which is based on modernized ship echosounders Sargan-EM, ELAC LAZ-72, Sargan-GM sonars and a multichannel system for digital recording of acoustic signals. Methane flux from the seabed into the water column was estimated using methods based on measuring the profiles of the sound backscattering at frequencies above the resonant frequency of the escaping bubbles.

**Results.** In 15 expeditions accomplished in the Sea of Okhotsk, 1168 individual seeps were recorded in the depth interval from 46 to 3330 m. To identify the patterns of the spatial distribution of seeps, a graph was plotted as their number vs the depth of their detection. The resulting graph shows five local maximums associated with the features of the bottom relief and the zone of stability of methane gas hydrate. The deepest known seeps in the Sea of Okhotsk were found in the northern and eastern slopes of the Kuril Basin at depths of 3330 and 2220 m, respectively. The seepage data were characterized by strong temporal variability, confined to tectonic activity in this region, causing a change in the intensity of the methane transported by them in the form of rising bubbles. It is shown that the flow of methane released by one of the seeps varied three orders in the range from 5 mmol/s to 5 mol/s. Based on the available acoustic data, the speed of the deep-water current in the Kuril Basin, ~7 cm/s, was calculated in the depth interval from 1100 to 2200 m.

**Key words:**

Sea of Okhotsk, deep and shallow Arctic hydrates, acoustic research, seeps, methane, deep-water currents, methane release from sea bottom to water column.

The authors of the work express their gratitude to the crew of the R/V «Akademik M.A. Lavrentiev». This work was partially carried out within the framework of state assignments no. AAAA-A20-120021990003-3 (AS, DV), 121021500057-4 (OD, IS and DK.), 0128-2021-0005 (RA) and the grants of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of sciences MK-3476.2021.1.5 (EG) and MK-535.2020.5 (AG). The studies were carried out in the context of a fundamental understanding of the changes in climatic processes occurring in the Arctic and subarctic seas within the framework of the Russian Science Foundation grant no. 21-77-30001 (IS). Certain aspects of the work were carried out within the framework of a grant from the Ministry of Education and Science (Grant Agreement No. 075-15-2020-978 NSh).

## REFERENCES

- Akulichev V.A., Obzhirov A.I., Shakirov R.B., Maltseva E.V., Gresov A.I., Telegin Y.A. Conditions of gas hydrate formation in the Sea of Okhotsk. *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 454, no 1, pp. 94–96.
- Andreasen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkepuliymbatta S., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Serov P., Deryabin A., Mattingdal R., Mienert J., Bunz S. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 2017, vol. 356, no. 6341, pp. 948–952.
- Greinert J., Artemov Y., Egorov V., De Batist M., McGinnis D. 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, vol. 244, no. 1–2, pp. 1–15.
- Greinert J., Bialas J., Lewis K., Suess E. Methane seeps at the Hikurangi Margin, New Zealand. *Marine Geology*, 2010, vol. 272, no. 1–4, pp. 1–3.
- James R.H., Bousquet P., Bussmann I., Haeckel M., Kipfer R., Leifer I., Niemann H., Ostrovsky I., Piskozub J., Rehder G., Treude T., Vielstadte L., Greinert J. Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: a review. *Limnology and Oceanography*, 2016, vol. 61, pp. S283–S299.
- Leifer I., Patro R.K. The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: a review and sensitivity study. *Continental Shelf Research*, 2002, vol. 22, no. 16, pp. 2409–2428.
- Makarov M., Muyakshin S., Kucher K., Aslamov I., Granin N. A study of the gas seep Istok in the Selenga shoal using active acoustic, passive acoustic and optical methods. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, vol. 46, pp. 95–101.
- Salomatin A.S., Yusupov V.I. Acoustic investigations of gas «Flares» in the Sea of Okhotsk. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 5, pp. 857–865.
- Sauer S., Hong W.-L., Yao H., Lepland A., Klug M., Eichinger F., Himmeler T., Crémère A., Panieri G., Schubert C. J., Knies J. Methane transport and sources in an Arctic deep-water cold seep offshore NW Svalbard (Vestnesa Ridge, 79°N). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2021, vol. 167, pp. 103430.
- Avdeyko G.P., Gavrilenko G.M., Chertkova L.V. «Vulkanologiya» issleduet podvodnyy fakel (o geologicheskikh izyskaniyakh nauchno-issledovatel'skogo sudna v Tikhom okeane) [«Volcanologists» examines an underwater torch (on geological surveys of a research vessel in the Pacific Ocean)]. *Priroda*, 1986, vol. 7, pp. 80–87.
- Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic shelf. *Geosciences*, 2019, vol. 9, pp. 1–23.
- Hovland M., Judd A., Burke R. The global flux of methane from shallow submarine sediments. *Chemosphere*, 1993, vol. 26, pp. 559–578.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Sokolova N., Bukhanov B. Evidence of gas emissions from permafrost in the Russian Arctic. *Geosciences*, 2020, vol. 10, no. 10. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/344363803\\_Evidence\\_of\\_Gas\\_Emissions\\_from\\_Permafrost\\_in\\_the\\_Russian\\_Arctic](https://www.researchgate.net/publication/344363803_Evidence_of_Gas_Emissions_from_Permafrost_in_the_Russian_Arctic) (accessed 26 July 2021).
- Myrvoll-Nilsen E., Sorbye S.H., Fredriksen H.B., Rue H., Rypdal M. Statistical estimation of global surface temperature response to forcing under the assumption of temporal scaling. *Earth Syst. Dynam.*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 329–345.
- Thornes J.E. IPCC, 2001: climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *International Journal of Climatology*, 2002, vol. 22, no. 10, pp. 1285–1286.
- Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2007. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/> (accessed 26 July 2021).
- Edenhofer O., Madrugá R.P., Sokona Y., Seyboth K., Matschoss P., Kadner S., Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G., Schlömer S., Stechow C. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the intergovernmental panel on climate change. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2011. 075 p. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/> (accessed 26 July 2021).
- Shindell D., Faluvegi G., Koch D., Schmidt G., Unger N., Bauer S. Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions. *Science*, 2009, vol. 326, pp. 716–718.
- Chernykh D., Yusupov V., Salomatin A., Kosmach D., Shakhova N., Gershelis E., Konstantinov A., Grinko A., Chuvilin E., Dudarev O., Koshurnikov A., Semiletov I. Sonar estimation of methane bubble flux from thawing subsea permafrost: a case study from the Laptev sea shelf. *Geosciences*, 2020, vol. 10, no. 10, 411.
- Ginsburg G.D., Soloviev V.A., Cranston R.E., Lorenson T.D., Kvenvolden K.A. Gas hydrates from the continental slope, offshore Sakhalin Island, Okhotsk Sea. *Geo-Marine Letters*, 1993, vol. 13, no. 1, pp. 41–48.
- Granin N., Muyakshin S., Makarov M., Kucher K., Aslamov I., Granina L., Mizandrontsev I. Estimation of methane fluxes from bottom sediments of Lake Baikal. *Geo-Marine Letters*, 2012, vol. 32, pp. 427–436.
- Salomatin A.S., Yusupov V.I., Vereshchagina O.F., Chernykh D.V. An acoustic estimate of methane concentration in a water column in regions of methane bubble release. *Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 6, pp. 671–677.
- Veloso M., Greinert J., Mienert J., De Batist M. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using splitbeam echosounders: examples from the Arctic offshore NW-Svalbard. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2015, vol. 13, no. 6, pp. 267–287.
- Leifer I., Chernykh D., Shakhova N., Semiletov I. Sonar gas flux estimation by bubbleinsonification: application to methane bubble flux from seep areas in the outer Laptev Sea. *Cryosphere*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 1333–1350.
- Mitchell G.A., Orange D.L., Gharib J.J., Kennedy P. Improved detection and mapping of deepwater hydrocarbon seeps: optimizing multibeam echosounder seafloor backscatter acquisition and processing techniques. *Marine Geophysical Research*, 2018, vol. 39, no. 1–2, pp. 323–347.
- Urban P., Köser K., Greinert J. Processing of multibeam water column image data for automated bubble/seep detection and repeated mapping. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 1–21.
- Römer M., Hsu C.-W., Loher M., Macdonald I., Ferreira C., Pape T., Mau S., Bohrmann G., Sahling H. Amount and fate of gas and oil discharged at 3400 m water depth from a natural seep site in the Southern Gulf of Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 2019, vol. 6. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/337300257\\_Amount\\_and\\_Fate\\_of\\_Gas\\_and\\_Oil\\_Discharged\\_at\\_3400\\_m\\_Water\\_Depth\\_From\\_a\\_Natural\\_Seep\\_Site\\_in\\_the\\_Southern\\_Gulf\\_of\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/337300257_Amount_and_Fate_of_Gas_and_Oil_Discharged_at_3400_m_Water_Depth_From_a_Natural_Seep_Site_in_the_Southern_Gulf_of_Mexico) (accessed 26 July 2021).
- Kasatkin S.A., Obzhirov A.I. Fluid-controlling significance of the Nosappu fracture zone and conditions for the formation of methane fluxes and gas hydrates (Sea of Okhotsk region). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 57–62.

29. Shakirov R.B., Obzhairov A.I., Salomatin A.S., Makarov M.M. New data on lineament control of modern centers of methane degassing in East Asian Seas. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 477, no. 1, pp. 1287–1290.
30. Kim Y.G., Lee S.M., Jin Y.K., Baranov B., Obzhairov A., Salomatin A., Shoji H. The stability of gas hydrate field in the northeastern continental slope of Sakhalin Island, Sea of Okhotsk, as inferred from analysis of heat flow data and its implications for slope failures. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, vol. 45, pp. 198–207.
31. Obzhairov A.I., Emelyanova T.A., Telegin Y.A., Shakirov R.B. Gas flows in the Sea of Okhotsk resulting from Cretaceous-Cenozoic tectonomagmatic activity. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 156–168.
32. Matveeva T., Solov'ev V.A. Gas hydrates in Sea of Okhotsk: regularities in formation and distribution. *Lithology and Mineral Resources*, 2003, vol. 47, pp. 101–112.
33. Hans N.C., Thor D.R., Sandstrom M.W., Kvenvolden K.A. Modern biogenic gas-generated craters (sea-floor «pockmarks») on the Bering Shelf, Alaska. *GSA Bulletin*, 1979, vol. 90, no. 12, pp. 1144–1152.
34. Volovov I.V. *Otazhenie zvuka ot dna okeana* [Sound reflection from the ocean bottom]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 272 p.
35. Weidner E., Weber T. C., Mayer L., Jakobsson M., Chernykh D., Semiletov I. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux. *Continental Shelf Research*, 2019, vol. 173, pp. 104–115.
36. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of gas hydrates distribution zones in the Arctic Ocean and adjacent offshore areas. *Geosciences*, 2018, vol. 8, no. 12, pp. 1–17.
37. *Operation report of Sakhalin slope gas hydrate project 2007, R/V «Akademik M.A. Lavrentyev» Cruise 43*. Kitami, Japan, Kitami Institute of Technology, 2008. 39 p.
38. Obzhairov A.I., Sokolova N.L., Telegin Y.A. Geological conditions of the formation and dissociation of gas hydrates in the Sea of Okhotsk: tectonic and genetic aspects. *Lithology and mineral resources*, 2021, vol. 56, no. 4, pp. 333–342.
39. The Earthquake Hazards Program Website is Moving. *Docslide*. 2021. Available at: <https://earthquake.usgs.gov> (accessed 23 February 2021).
40. Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Vikulina S.A., Kravchenko N.M., Matveenko E.A., Mityushkina S.V., Raevskaya A.A., Saltykov V.A., Chebrov D.V., Lander A.V. Glubokoe okhotomorskoe zemletryasenie 24.05.2013 g. s magnitudoy mw=8,3 – silneyshee seysmicheskoe sobytie u beregov Kamchatki za period detalnykh seysmologicheskikh nablyudeniy [Deep Sea of Okhotsk earthquake on May 24, 2013 with a magnitude of mw=8,3 – the strongest seismic event off the coast of Kamchatka during the period of detailed seismological observations]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2013, vol. 21, pp. 17–24.
41. Kutas R.I., Paliy S.I., Rusakov O.M. Deep faults, heat flow and gas leakage in the northern Black Sea. *Geo-Marine Lett.*, 2004, vol. 24, pp. 163–168.
42. Parovyshny V.A., Senachin V.N., Veselov O.V., Kochergin E.V. Temporal variations in geophysical fields and earthquake forecasting issues. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 63–76.
43. Shakhova N.E., Alexeev V.A., Semiletov I.P. Predicted methane emission on the East Siberian shelf. *Doklady Earth Sciences*, 2010, vol. 430 (2), pp. 190–193.
44. Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Modern state of the role of the East Siberian Shelf in the methane cycle. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 79, no. 6, pp. 507–518.
45. Shakhova N.E., Nicolovsky D., Semiletov I.P. Current state of subsea permafrost on the East-Siberian Shelf: tests of modeling results based on field observations. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 429 (2), pp. 1518–1521.
46. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolovsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson Ö. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2015, vol. 373, no. 2052, 20140451.

Received 4 August 2021.

#### Information about the authors

**Denis V. Chernykh**, Cand. Sc., researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute.

**Alexander S. Salomatin**, Cand. Sc., head of the Laboratory, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute.

**Vladimir I. Yusupov**, Cand. Sc., senior researcher, Russian Academy of Sciences Institute of Photon Technologies, Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics».

**Natalia E. Shakhova**, Dr. Sc., professor, chief researcher, Laboratory of Arctic Research, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute; chief researcher, Higher School of Economics

**Denis A. Kosmach**, researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute.

**Oleg V. Dudarev**, Dr. Sc., chief researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute

**Elena V. Gershelis**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University,

**Vyacheslav I. Silionov**, lead engineer, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute

**Roman A. Ananiev**, researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

**Igor P. Semiletov**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc., professor, head of the Laboratory of Arctic Research, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute; principal investigator, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Andrey A. Grinko**, Cand. Sci., engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276.63

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ НА ВЯЗКОСТЬ НЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Мингулов Ильдар Шамилович<sup>1</sup>,  
task3@mail.ru

Валеев Марат Давлетович<sup>2</sup>,  
vm5943@mail.ru

Мухаметшин Вячеслав Вячеславович<sup>3</sup>,  
vv@of.ugntu.ru

Мингулов Шамиль Григорьевич<sup>1</sup>,  
vsh@of.ugntu.ru

Кулешова Любовь Сергеевна<sup>1</sup>,  
markl212@mail.ru

<sup>1</sup> Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском, Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

<sup>2</sup> ООО «НПП «ВМ система», Россия, 450516, Республика Башкортостан, Уфимский район, с. Кумлекуль, ул. Береговая, 46.

<sup>3</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность.** В связи с широким изменением значений температур и обводненности добываемой парафинистой нефти необходимо наличие ряда исходных данных, в том числе о вязкости нефти, для установления технологических режимов эксплуатации скважин. В связи со значительным ростом обводненности продукции месторождений вязких парафинистых нефтей изучение влияния этих параметров на реологические свойства добываемой продукции для увеличения рентабельности разработки месторождений является весьма актуальным.

**Цель:** изучить влияние температуры, обводненности и скорости течения водонефтяных эмульсий на вязкостную характеристику.

**Объекты:** искусственные водонефтяные эмульсии Кюенгопского месторождения, изготовленные из естественных проб.

**Методы.** Исследование реологических характеристик водонефтяных эмульсий проводилось в лабораторных условиях с использованием ротационного вискозиметра «Роотест-2».

**Результаты.** Получена зависимость эффективной вязкости обратных эмульсий от обводненности нефти Гремихинского нефтяного месторождения, показывающая ее экспоненциальный характер в диапазоне содержания воды 0–69 %. Дальнейшее увеличение обводненности приводит к резкому многократному снижению значения вязкости из-за инверсии фаз в эмульсии. Установлены границы перехода ньютоновских свойств водонефтяных эмульсий в неньютоновские (вязкопластичные) по содержанию внутренней водной фазы и влияние на переходный процесс температуры среды. Установлено, что изменение вязкости безводной нефти в интервале температур 7–20 °С происходит во всем диапазоне изменения угловой скорости вращения измерительного цилиндра, причем чем меньше скорость, тем больше предел изменения вязкости. С увеличением содержания воды в исследуемой среде верхняя граница температурного интервала, в котором вязкость эмульсии непостоянна, повышается. Уменьшение скорости течения водонефтяной эмульсии в промышленном оборудовании (скважине и трубопроводах) приводит к росту эффективной вязкости при прочих равных условиях, что необходимо учитывать при проектировании технологических процессов в нефтедобыче.

**Ключевые слова:**

Нефтяные эмульсии, реология, градиент скорости течения, неньютоновские свойства нефти, вязкопластичные свойства.

### Введение

Известно, что геолого-физические и физико-химические свойства пластов и насыщающих их флюидов оказывают существенное влияние на величину текущей добычи нефти, сроки разработки, конечную нефтеотдачу и, как следствие, на величину рентабельности разработки объектов добычи [1–10].

Важное значение при этом имеет установление технологического режима эксплуатации насосных скважин при добыче вязких парафинистых нефтей, которое требует наличия ряда исходных данных, в число кото-

рых входит и вязкость нефти как безводной, так и при различной степени обводненности (с учетом температурной зависимости). Вследствие сложного реологического поведения высоковязких нефтей с повышением содержания пластовой воды при изменении вязкости приборы фиксируют их кажущуюся или эффективную вязкость, которая не имеет физического смысла, если не указаны условия (тип вискозиметра и величины градиента скорости) их движения. Кроме того, использование эффективной вязкости в условиях, отличных от тех, в которых она замерена, может привести к искажению результатов.

Для проведения гидродинамических расчетов как для скважин, так и для промысловых трубопроводов важно располагать реологической моделью нефти и ее эмульсии с попутно-добываемой пластовой водой. Согласно исследованиям [11–14] наиболее точной моделью реологического поведения нефтяных эмульсий является степенная зависимость напряжения сдвига от градиента скорости. Иными словами, эмульсии соответствуют псевдопластичному поведению жидкости.

В этой связи в данной статье представлены экспериментальные материалы по коэффициентам псевдопластичной модели водонефтяных эмульсий обратного типа, в которых внешней фазой является нефть, а внутренней – вода.

#### Методы и материалы

Наиболее широко для построения реологических кривых, то есть для установления соответствия между значениями градиента скорости и напряжения сдвига, используются ротационные вискозиметры. При этом жидкость, подвергающаяся исследованию, находится между двумя цилиндрами. Зная скорость вращения цилиндра, ширину зазора и вращающий момент, можно рассчитать реологические параметры исследуемых водонефтяных эмульсий.

Для измерения вязкости продукции скважин в промысловых условиях известен переносной вискозиметр нефти, основанный на отборе пробы жидкости из манифольдной линии скважины и замера времени качения шара в калиброванной трубке (принцип работы прибора Гепплера). В корпусе прибора закреплены калиброванные трубки разного внутреннего диаметра с размещенными внутри них ферромагнитными шариками одного диаметра.

Отбор жидкости и непосредственно следующий за ним замер вязкости позволяют в большой степени сохранить температуру измеряемой среды.

Несомненными преимуществами вискозиметра являются: возможность переноса прибора к точке отбора нефти из трубопровода, быстрота и оперативность измерения вязкости при различных давлениях и температурах жидкостей в трубопроводах. Однако полную реологическую кривую течения прибор получить не позволяет, и поэтому он применяется для оценочных измерений вязкости нефти на больших группах скважин.

В этой связи исследование реологической характеристики искусственных водонефтяных эмульсий Гремихинского и Киенгопского месторождений (Республика Удмуртия) [11, 15, 16] проводилось на ротационном вискозиметре «Реотест-2». В качестве исследуемых сред применялись естественные пробы с добывающих скважин и эмульсии, приготовленные в лабораторных условиях.

Исследование вязкостной характеристики нефтяных эмульсий проводилось в следующем диапазоне: температура – 7–30 °С; содержание воды – 0–70 %.

По результатам исследований строились зависимости влияния исследуемого параметра на вязкостную характеристику водонефтяной эмульсии.

#### Результаты и обсуждение

Проведенные исследования при градиенте скорости  $45 \text{ мин}^{-1}$  показали, что с увеличением содержания водной фазы резко возрастает вязкость водонефтяной эмульсии и сохраняет свое максимальное значение в довольно широком интервале обводненности, порядка 40–69 % [12–14, 16–20] (рис. 1). Дальнейшее увеличение обводненности приводит к инверсии фаз и резкому снижению вязкости.

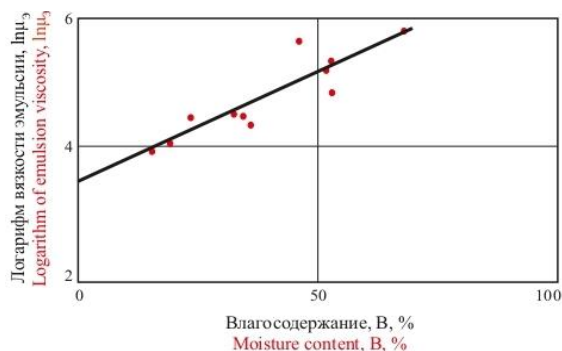


Рис. 1. Влияние влагосодержания на вязкость Гремихинской нефти при  $T=18 \text{ °C}$

Fig. 1. Moisture content influence on viscosity of Gremikhinsk oil at  $T=18 \text{ °C}$

Результаты, полученные на искусственных эмульсиях для двух скважин, сопоставимы, что позволяет проводить дальнейшие исследования с достаточной точностью на средах, приготовленных из исходных компонентов в лабораторных условиях.

Известно [12, 16], что изменение содержания водной фазы и температуры оказывает совокупное влияние на вязкостную характеристику исследуемых эмульсий. При этом изменение одного параметра влечет за собой и изменение влияний другого параметра на измеряемую вязкость.

Степень влияния каждого из параметров и их совокупности на вязкостную характеристику эмульсии Гремихинской нефти отражена на рис. 2. Из приведенных результатов видно, что чем меньше температура и больше содержание водной фазы, тем более крутой характер имеют полученные зависимости.

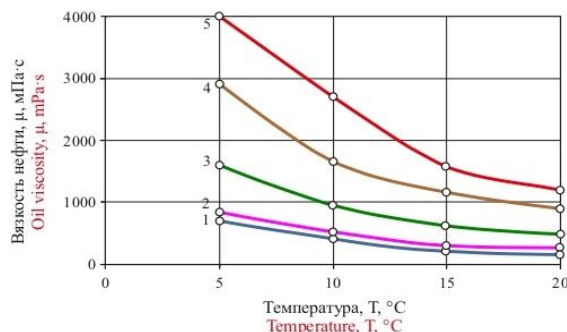


Рис. 2. Влияние температуры и влагосодержания на вязкость. Шифр кривых – содержание воды, %: 1) 0,18; 2) 5; 3) 15; 4) 30; 5) 50

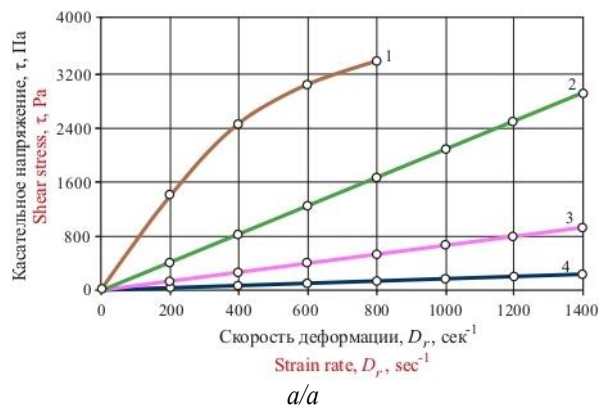
Fig. 2. Temperature and moisture content influence on viscosity. The number of lines is the water content, %: 1) 0,18; 2) 5; 3) 15; 4) 30; 5) 50

Таким образом, в ходе лабораторных исследований установлены пределы изменения вязкости эмульсии в зависимости от обводненности и температуры, причем вязкость их растет с увеличением содержания воды, ее плотности и с уменьшением температуры [16, 18].

Дальнейшие исследования реологических свойств обводненных нефтей проводили в интервале температур и диапазоне сдвиговых скоростей, соответствующих параметрам добычи нефти в скважинах [19]: интервал температур – 1–40 °С; диапазон скоростей – 5/9–240 об/мин.

Исследования проводились на ротационном вискозиметре «Реотест-2» на нефтяных средах того же месторождения.

По результатам исследований реологической характеристики нефтяной эмульсии месторождения, содержащей 17 % воды, построена зависимость касательного напряжения от скорости деформации (рис. 3, а). Из приведенного рисунка видно, что результаты исследований в координатах напряжение сдвига – градиент скорости сдвига при 40 °С ложатся на прямую линию,



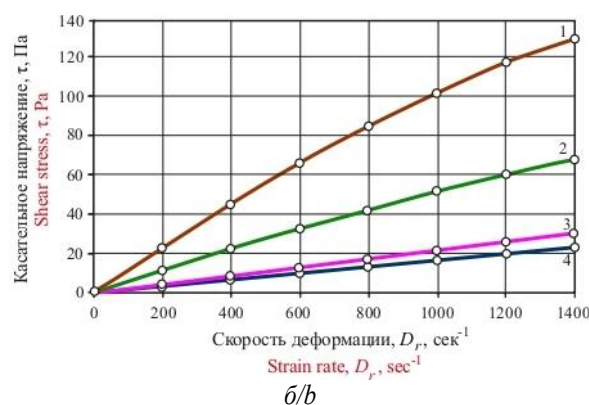
выходящую из начала координат (линия 4). В этом случае исследованная жидкость проявляет свойства ньютоновской жидкости. Остальные зависимости, соответствующие форме кривых (линии 1–3), характеризуют поведение псевдопластичных жидкостей.

Приняв в качестве модели уравнения регрессии формулу  $\tau_r = K(D_r)^n$ , соответствующей форме кривых (линии 1–3), определены коэффициенты ( $K$ ) и ( $n$ ) из статической обработки образующихся пар данных касательного напряжения сдвига ( $\tau_r$ ) и скорости деформации ( $D_r$ ). Значение ( $D_r$ ) берется из паспортных данных на прибор «Реотест-2».

Так, для температуры 15 °С данные для статистической обработки выглядят следующим образом (таблица).

Полученные уравнения имеют вид:

- $t=15\text{ °C}, \tau_r = 5,05 \cdot D_r^{0,495}$ ;
- $t=20\text{ °C}, \tau_r = 0,16 \cdot D_r^{0,94}$ ;
- $t=30\text{ °C}, \tau_r = 0,042 \cdot D_r^{0,97}$ ;
- $t=40\text{ °C}, \tau_r = 0,007 \cdot D_r$ .



**Рис. 3.** Зависимость касательного напряжения от скорости деформации: а) 1 –  $T=15\text{ °C}$ ; 2 –  $T=20\text{ °C}$ ; 3 –  $T=30\text{ °C}$ ; 4 –  $T=40\text{ °C}$ ;  $B=17\%$ ; б) 1 –  $T=1\text{ °C}$ ; 2 –  $T=10\text{ °C}$ ; 3 –  $T=20\text{ °C}$ ; 4 –  $T=30\text{ °C}$ ;  $B=0\%$

**Fig. 3.** Shear stress/strain rate dependence: а) 1 –  $T=15\text{ °C}$ ; 2 –  $T=20\text{ °C}$ ; 3 –  $T=30\text{ °C}$ ; 4 –  $T=40\text{ °C}$ ;  $B=17\%$ ; б) 1 –  $T=1\text{ °C}$ ; 2 –  $T=10\text{ °C}$ ; 3 –  $T=20\text{ °C}$ ; 4 –  $T=30\text{ °C}$ ;  $B=0\%$

**Таблица.** Исходные данные для расчёта коэффициентов  $K$  и  $n$

**Table.** Initial data for calculating the coefficients  $K$  and  $n$

Число оборотов цилиндра прибора, мин <sup>-1</sup> Number of rounds of the device cylinder, min <sup>-1</sup>	5/9	1	5/3	3	5	9	15	27	45	81	135
$D_r$	3	5,4	9	16,2	27	48,6	81	145,8	243	437,4	729
$\tau_r$	2,1	3,5	5,5	10,1	15,5	25	36	59	85	127	170

Анализируя значения коэффициентов  $K$  и  $n$  и сопоставляя с кривыми на рис. 3, а, видим, что при температуре 40 °С зависимость линейная, а исследованная нефть при данной температуре ньютоновская. По мере снижения температуры коэффициент  $n$  уменьшается, а коэффициент  $K$  увеличивается.

Коэффициент  $n$  является характеристикой уровня нелинейности поведения жидкости. Чем значительнее  $n$  отличается от 1, тем в большей мере проявляются неньютоновские свойства жидкости.

Коэффициент  $K$  характеризует уровень консистенции жидкости. Чем больше  $K$ , тем больше вязкость жидкости.

С увеличением температуры от 15 до 30 °С снижаются неньютоновские свойства исследованной нефтяной эмульсии, о чем свидетельствует изменение коэффициентов  $K$  и  $n$ .

С целью получения дополнительной информации проведены исследования реологической характеристики безводных нефтей этого же месторождения.

Обработка результатов полученной зависимости касательного напряжения сдвига нефти позволила определить уравнение регрессии безводной Гремичинской нефти при различных температурах:

- $t=7\text{ °C}, \tau_r = 0,45 \cdot D_r^{0,878}$ ;

- $t=13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_r = 0,15 \cdot D_r^{0,956}$ ;
- $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_r = 0,07 \cdot D_r^{0,98}$ ;
- $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_r = 0,03 \cdot D_r$ .

В результате исследований установлено, что в интервале температур 7–20 °С безводная нефть Гремичинского месторождения проявляет вязкопластичные свойства.

При температуре выше 20 °С нефть приобретает уже свойства ньютоновской жидкости (рис. 3, б).

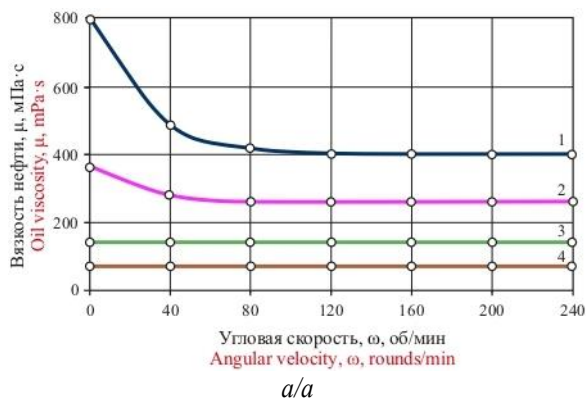
Проведенными исследованиями установлены температурная зависимость вязкости, влияние содержания водной фазы и скорости деформации на напряжение сдвига на срез.

Для определения динамической вязкости у ньютоновских жидкостей достаточно провести одноточечное измерение при любом приложенном градиенте напряжения на сдвиг. Динамическая вязкость определяется как отношение касательного напряжения к градиенту сдвига.

У неньютоновской нефти для характеристики их реологических свойств регистрируют, как правило, всю кривую течения жидкости. С этой целью измерения начинают с низких величин градиента сдвига. Повышение градиента сдвига осуществляют увеличением числа оборотов измерительного цилиндра от 5/9 до 243 об/мин. Оценку реологической характеристики исследованной среды производят по полученной зависимости изменения вязкости нефтяной эмульсии от угловой скорости вращения цилиндра.

Данные зависимости, полученные при исследовании нефтей Киенгопского месторождения, приведены на рис. 5.

Полученные зависимости показывают, что изменение вязкости безводной нефти в интервале температур 7–13 °С происходит во всем диапазоне изменения угловой скорости вращения измерительного цилиндра, причем чем меньше скорость, тем больше предел изменения вязкости. С увеличением содержания воды в исследуемой среде верхняя граница температурного интервала, в котором вязкость эмульсии непостоянна, повышается.



Принимая, что уменьшение угловой скорости вращения цилиндра при снятии реологических кривых на приборе «Реотест-2» тождественно уменьшению скорости откачки насосного оборудования в эксплуатационной скважине, уменьшение скорости откачки (дебита) неньютоновской жидкости повлечёт за собой неизбежное увеличение вязкости нефти, гидродинамических сил трения и увеличение нагрузки на головку балансира.

Нефтяные эмульсии в ряде случаев проявляют вязкоупругие свойства, связанные с межкапельным взаимодействием и проявлением тиксотропных свойств парафинистых нефтей. В работе [13] приведены результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях.

Получение реологических кривых по методике Кросса в координатах «эффективное значение вязкости ( $\mu_{эф}^{-2}$ ) – напряжение ( $\tau^2$ )» позволяет оценить наличие упругих свойств нефти, особенно при малых деформациях сдвига. С высокой степенью вероятности можно сказать, что причиной наличия таких свойств нефти является упругость на изгиб пространственных решёток, образованных молекулами парафина. В потоке жидкости образованная в состоянии покоя пространственная структура парафина разрушается на более мелкие ее части и в известной степени сохраняющие заметную упругость.

Механическое сопротивление деформации решетки, образованной по всему объему жидкости в состоянии покоя, является одновременно причиной появления статистических напряжений сдвига. В начальный момент сдвига слоев жидкости необходимо преодолеть эту силу упругости и разрушить образованную структурную решетку. При этом рвутся наиболее слабые связи разветвленных длинных молекул парафина.

Построение графической зависимости  $\mu_{эф}^{-2}$  от  $\tau$  показывает, как изменяется величина  $\mu_{эф}$ , известная как эффективное значение вязкости, рассчитанное как отношение напряжения  $\tau$  к скорости сдвига  $\gamma$  в какой-либо точке кривой течения. Ввиду того, что зависимость  $\tau$  от  $\gamma$  в неравновесных системах является нелинейной, величина  $\mu_{эф}$  является величиной непостоянной и имеющей тенденцию снижения по мере увеличения  $\gamma$ .

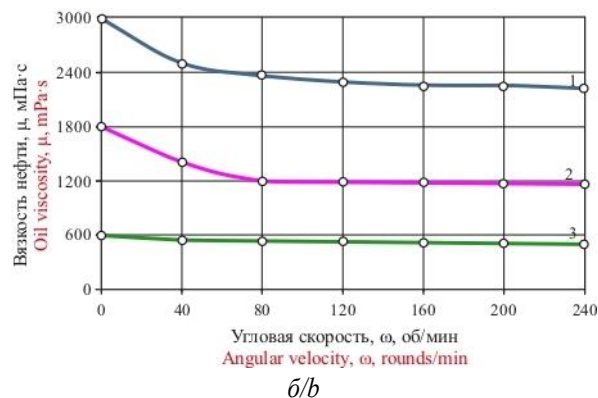


Рис. 5. Зависимость вязкости нефти от угловой скорости измерительного цилиндра: а) 1 –  $T=7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T=13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $B=0,15\%$ ; б) 1 –  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $B=36\%$

Fig. 5. Oil viscosity/measuring cylinder angular velocity dependence: а) 1 –  $T=7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T=13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $B=0,15\%$ ; б) 1 –  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $B=36\%$



Упругие свойства нефти по мере роста  $\tau^2$  постепенно ослабевают из-за большего разрушения структуры и при  $\tau^2 > 3,0 \cdot 10^4$  практически исчезают. Такая кривая позволяет рассчитывать модуль сдвиговой упругости жидкости и использовать ее в практике пусковых режимов скважин и промысловых трубопроводов.

Упругие свойства нефтей необходимо учитывать при высоких содержаниях парафина в нефти, таких как нефти Гремихинского и Киенгопского месторождений с содержанием парафина 6 % мас. и более.

Борьба с тиксотропными свойствами нефтей на промыслах сводится к механическому воздействию на жидкость с помощью различных конструкций вибраторов. Размещение их, к примеру, внутри трубопроводов вызывает их вибрацию с различной частотой гидродинамическим воздействием потока. Несмотря на гидравлические потери в самом вибраторе, снижение гидравлических сопротивлений по длине трубопровода в сравнении с ними более существенно.

В работе глубиннонасосного оборудования скважин важным является пусковой период после вынужденных или плановых установок. Длительное пребывание нефти в стволе скважины в состоянии покоя приводит к формированию в ней тиксотропной структуры и резкому росту сил гидродинамического трения штанг в жидкости. В целях предупреждения аварии насосных штанг в начальный период пуска насоса в работу осуществляют кратковременные запуски станка-качалки, при которых происходит раз-

рушение тиксотропной структуры и снижение эффективной вязкости нефти или ее эмульсии.

#### Выводы

1. Получена зависимость эффективной вязкости обратных эмульсий от обводненности нефти Гремихинского нефтяного месторождения, показывающая ее экспоненциальный характер в диапазоне содержания воды 0–69 %. Дальнейшее увеличение обводненности приводит к резкому многократному снижению значения вязкости из-за инверсии фаз в эмульсии.
2. Установлены границы перехода ньютоновских свойств водонефтяных эмульсий в неньютоновские (вязкопластичные) по содержанию внутренней водной фазы и влияние на переходный процесс температуры среды.
3. Изменение вязкости безводной нефти в интервале температур 7–20 °С происходит во всем диапазоне изменения угловой скорости вращения измерительного цилиндра, причем чем меньше скорость, тем больше предел изменения вязкости. С увеличением содержания воды в исследуемой среде верхняя граница температурного интервала, в котором вязкость эмульсии непостоянна, повышается.
4. Уменьшение скорости течения водонефтяной эмульсии в промышленном оборудовании (скважине и трубопроводах) приводит к росту эффективной вязкости при прочих равных условиях, что необходимо учитывать при проектировании технологических процессов в нефтедобыче.
9. Justification of impact and planning of technology efficiency on the basis of liny-emulsion formulation in low-permeability highly-rugged reservoirs of Tyumen deposits / V.I. Khokhlov, Sh.S. Galimov, S.G. Devyatkov, Yu.A. Kotenev, Sh.Kh. Sultanov, V.Sh. Mukhametshin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (IPDME 2019 – International Workshop on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering). – 2019. – V. 378. – Iss. 1 (012114). – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012114.
10. Huh C., Pope G.A. Residual oil saturation from polymer floods: laboratory measurements and theoretical interpretation // SPE Symposium on Improved Oil Recovery. – Tulsa, Oklahoma, USA, 20–23 April 2008. – 21 p. DOI: 10.2118/113417-MS.
11. Кудинов В.И., Сучков Б.М. Методы повышения производительности скважин. – Самара: Кн. изд-во, 1996. – 411 с.
12. Структурно-механические свойства парафинонаполненных нефтяных дисперсных систем / З.И. Сюняев, Ю. Аби-Фадель Р.З. Сюняев, Р.З. Сафиева // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1979. – № 10. – С. 12–14.
13. Опытные-промышленные исследования тиксотропной деструкции парафинистой нефти в промышленном трубопроводе / М.Д. Валеев, А.К. Зарипов, А.Ю. Давыдов, Л.М. Зарипова // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 6. – С. 32–35.
14. Marsden S.S., Raghavan R. A system for producing and transporting crude oil as an oil water emulsion // Journal of the Institute of Petroleum. – 1973. – № 570. – P. 273–278.
15. Каменщиков Ф.А. Тепловая депарафинизация скважин. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 254 с.
16. Нестационарные режимы работы глубиннонасосных скважин с вязкими и парафинистыми нефтями / Ф.Г. Сабиров, Ф.А. Каменщиков, А.Ш. Валеев, А.М. Насыров. – Уфа: Китап, 1999. – 67 с.
17. Bortolotti V., Macini P., Srisuriyachai F. Laboratory evaluation of alkali and alkali-surfactant-polymer flooding combined with intermittent flow in carbonatic rocks // Asia Pacific Oil and Gas

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Identification and evaluation of high-performance EOR surfactants / D. Levitt, A. Jackson, C. Heinson, L.N. Britton, T. Malik, V. Dwarakanath, G.A. Pope // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2009. – V. 12. – Iss. 2. – P. 243–253. DOI: 10.2118/100089-PA.
2. Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. Обоснование систем заводнения низкопродуктивных залежей нефти в условиях ограниченного объема информации // SOCAR Proceedings. – 2019. – № 2. – С. 16–22. DOI: 10.5510/OGP20190200384.
3. Economides J.M., Nolte K.I. Reservoir stimulation. – West Sussex, England: John Wiley and Sons, 2000. – 856 p.
4. Мухаметшин В.В., Андреев В.Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на расширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 30–36.
5. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir // Periodico Tche Quimica. – 2018. – V. 15. – Iss. 30. – P. 725–733.
6. Integration of a risk management tool and an analytical simulator for assisted decision-making in IOR / V. Alvarado, E.-M. Reich, Yi Yunfeng, K. Potsch // SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition. – Vienna, Austria, 12–15 June 2006. – 6 p. DOI: 10.2118/100217-MS.
7. Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. О снижении уровня неопределенности при управлении заводнением залежей с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 140–146. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2644.
8. Дмитриевский А.Н., Еремкин Н.А., Шабалин Н.А. Углеводородный потенциал Арктической зоны Сибирской платформы // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 1. – С. 4–10.

- Conference & Exhibition. – Jakarta, Indonesia, 4–6 August 2009. – 13 p. DOI: 10.2118/122499-MS.
18. Soloviev N.N., Mukhametshin V.Sh., Safiullina A.R. Developing the efficiency of low-productivity oil deposits via internal flooding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (International Conference on Extraction, Transport, Storage and Processing of Hydrocarbons & Materials (ETSaP)). – 2020. – V. 952. – Iss. 012064. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/952/1/012064.
19. Streamline simulation for enhanced-oil recovery: review and laboratory tests / V. Alvarado, M. Stirpe, C. La Roque, R. Ponce, M. Farias // Proceedings of INGEPET, EXPL-4-VA-84. – Lima, 2002. – P. 265–279.
20. Simon R. Downhole emulsification in oil well // Journal of Petroleum Technology. – 1968. – V. 20. – № 12. – P. 1349–1353.

Поступила 20.09.2021 г.

#### Информация об авторах

**Мингулов И.Ш.**, преподаватель кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

**Валеев М.Д.**, доктор технических наук, профессор, технический директор, ООО «НПП «ВМ система».

**Мухаметшин В.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Мингулов Ш.Г.**, доктор технических наук, профессор кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, начальник отдела по связям с бизнес-сообществом, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

**Кулешова Л.С.**, старший преподаватель кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, заместитель директора по УР, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

UDC 622.276.63

## STUDY OF TEMPERATURE AND FLOW RATE INFLUENCE ON THE VISCOSITY OF OIL EMULSIONS

Ildar Sh. Mingulov<sup>1</sup>,  
task3@mail.ru

Marat D. Valeev<sup>2</sup>,  
vm5943@mail.ru

Vyacheslav V. Mukhametshin<sup>3</sup>,  
vv@of.ugntu.ru

Shamil G. Mingulov<sup>1</sup>,  
vsh@of.ugntu.ru

Lyubov S. Kuleshova<sup>1</sup>,  
markl212@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky, 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

<sup>2</sup> LLC «RDE "VM Sistema"», 46, Beregovaya street, Kumlekul village, Ufa region, Republic of Bashkortostan, 450516, Russia.

<sup>3</sup> Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

**Relevance.** Due to the wide variation in the values of temperatures and water-cut of the produced paraffinic oil, it is necessary to have some initial data, including the oil viscosity, to establish the technological modes of well operation. In relation to a significant increase in the water cut of viscous paraffinic oil fields production the study of these parameters influence on rheological properties of the produced product for profitability of field development increasing is highly relevant.

**Objective:** to study the temperature, water cut, and flow rate influence on the viscosity characteristics of oil-water emulsions.

**Objects:** artificial water-oil emulsions of the Kiengop oil field, made from natural samples.

**Methods.** The study of the rheological characteristics of water-in-oil emulsions was carried out in laboratory conditions using a rotary viscometer «Rootest-2».

**Results.** The authors have obtained the dependence of the effective viscosity of inverse emulsions on the oil water cut in the Kiengop oil field, depicting its exponential nature in the range of water content of 0–69 %. A further increase in water cut leads to a sharp multiple decrease in the viscosity value due to the phase inversion in the emulsion. The authors established the boundaries of the Newtonian properties of water-oil emulsions transition into non-Newtonian (viscoplastic) ones by the content of the internal water phase and the temperature effect of the medium on the transient process. It was found that the change in the viscosity of dry crude oil in the temperature range of 7–20 °C occurs in the entire range of changes in the angular rotation velocity of the measuring cylinder, and the lower the speed, the greater the limit of the change in viscosity. With the increase in the water content in the test medium, the upper limit of the temperature range, in which the viscosity of the emulsion is not constant, increases. The decrease in oil-water emulsion flow rate in the field equipment (wells and pipelines) leads to increase in effective viscosity, all other things being equal, which must be taken into account when designing technological processes in oil production.

### Key words:

Oil emulsions, rheology, flow rate gradient, non-Newtonian oil properties, viscoplastic properties.

### REFERENCES

- Levitt D., Jackson A., Heinson C., Britton L.N., Malik T., Dwarakanath V., Pope G.A. Identification and Evaluation of High-Performance EOR Surfactants. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2009, vol. 12, Iss. 2, pp. 243–253. DOI: 10.2118/100089-PA.
- Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Justification of low-productive oil deposits flooding systems in the conditions of limited information amount. *SOCAR Proceedings*, 2019, no. 2, pp. 16–22. DOI: 10.5510/OGP20190200384. In Rus.
- Economides J.M., Nolte K.I. *Reservoir stimulation*. West Sussex, England, John Wiley and Sons, 2000. 856 p.
- Mukhametshin V.V., Andreev V.E. Increasing the efficiency of assessing the performance of techniques aimed at expanding the use of resource potential of oilfields with hard-to-recover reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 30–36. In Rus.
- Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir. *Periodico Tche Quimica*, 2018, vol. 15, Iss. 30, pp. 725–733.
- Alvarado V., Reich E.-M., Yunfeng Yi., Potsch K. Integration of a risk management tool and an analytical simulator for assisted decision-making in IOR. *SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition*. Vienna, Austria, June 12–15, 2006. 6 p. DOI: 10.2118/100217-MS.
- Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. On uncertainty level reduction in managing waterflooding of the deposits with hard to extract reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 140–146. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2644.
- Dmitrievsky A.N., Eremin N.A., Shabalin N.A. Hydrocarbon potential of the Arctic zone of the Siberian platform. *Geology*,

- geophysics and development of oil and gas fields*, 2018, no. 1, pp. 4–10. In Rus.
9. Khokhlov V.I., Galimov Sh.S., Devyatkova S.G., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh., Mukhametshin V.Sh. Justification of impact and planning of technology efficiency on the basis of limy-emulsion formulation in low-permeability highly-rugged reservoirs of Tyumen deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (IPDME 2019 – International Workshop on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering)*, 2019, vol. 378, Iss. 1 (012114), pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012114.
  10. Huh C., Pope G.A. Residual oil saturation from polymer floods: laboratory measurements and theoretical interpretation. *SPE Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, Oklahoma, USA, April 20–23, 2008. 21 p. DOI: 10.2118/113417-MS.
  11. Kudinov V. I., Suchkov B. M. *Metody povysheniya proizvoditelnosti skvazhin* [Methods of increasing the productivity of wells]. Samara, Kn. izd-vo, 1996. 411 p.
  12. Syunyaev Z.I., Abi-Fadel Yu., Syunyaev R.Z., Safieva R.Z. Strukturno-mekhanicheskie svoystva parafinonapolnennykh neftnyakh dispersnykh sistem [Structural and mechanical properties of paraffin-filled oil dispersed systems]. *Oil Refining and Petrochemistry*, 1979, no. 10, pp. 12–14.
  13. Valeev M.D., Zaripov A.K., Davydov A.Yu., Zaripova L.M. Experimental-industrial research of thixotropic paraffin oil destruction in field pipelines. *Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2016, no. 6, pp. 32–35. In Rus.
  14. Marsden S.S., Raghavan R. A system for producing and transporting crude oil as an oil water emulsion. *Journal of the Institute of Petroleum*, 1973, no. 570, pp. 273–278.
  15. Kamenshchikov F.A. *Teplovaya deparafinizatsiya skvazhin* [Thermal dewaxing of wells]. Moscow, Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2005. 254 p.
  16. Sabirov F.G., Kamenshchikov F.A., Valeev A.Sh., Nasyrov A.M. *Nestatsionarnye rezhimy raboty glubinnonasosnykh skvazhin s vyazkimi i parafinistymi neftnyami* [Non-stationary modes of operation of deep-pump wells with viscous and paraffinous oils]. Ufa, Kitap Publ., 1999. 67 p.
  17. Bortolotti V., Macini P., Srisuriyachai F. Laboratory evaluation of alkali and alkali-surfactant-polymer flooding combined with intermittent flow in carbonatic rocks. *Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition*. Jakarta, Indonesia, August 4–6, 2009. 13 p. DOI: 10.2118/122499-MS.
  18. Soloviev N.N., Mukhametshin V.Sh., Safiullina A.R. Developing the efficiency of low-productivity oil deposits via internal flooding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (International Conference on Extraction, Transport, Storage and Processing of Hydrocarbons & Materials (ETSaP))*, 2020, vol. 952, Iss. 012064, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/952/1/012064.
  19. Alvarado V., Stirpe M., La Roque C., Ponce R., Farias M. Streamline simulation for enhanced-oil recovery: review and laboratory tests. *Proceedings of INGEPET*. EXPL-4-VA-84. Lima, 2002. pp. 265–279.
  20. Simon R. Downhole emulsification in oil well. *Journal of Petroleum Technology*, 1968, vol. 20, no. 12, pp. 1349–1353.

*Received: 20 August 2021.*

#### Information about the authors

**Ildar Sh. Mingulov**, lecturer, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

**Marat D. Valeev**, Dr. Sc., professor, technical director, LLC «RDE "VM Sistema"».

**Vyacheslav V. Mukhametshin**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Shamil G. Mingulov**, Dr. Sc., professor, head of the Department for Relations with the Business Community, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

**Lyubov S. Kuleshova**, senior lecturer, deputy director for Academic Affairs, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

УДК 622.279

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫНОСА ВОДЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ С ЗАБОЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Уразаков Камил Рахматуллович<sup>1</sup>,  
urazakk@mail.ru

Алиметов Шамиль Агаметович<sup>2</sup>,  
felix8047@mail.ru

Тугунов Павел Михайлович<sup>1</sup>,  
PavelTugunov@gmail.com

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>2</sup> «Когалымнефтегаз», ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь»,  
Россия, 628486, г. Когалым, ул. Прибалтийская, 20.

**Актуальность.** На сегодняшний день эксплуатация значительной доли нефтяных месторождений ведется механизированным способом и сопровождается рядом осложнений, обусловленных снижением дебита добывающих скважин, обводнением продукции, коррозией и отложением механических примесей в узлах насосного оборудования. Накопление пластовой воды и механических примесей в стволе скважин приводит к увеличению плотности смеси в скважине, снижению депрессии на пласт и дебита, повышению темпов коррозионного износа обсадной колонны. В этой связи одной из наиболее актуальных задач рентабельной эксплуатации скважин является обеспечение условий выноса пластовой воды и механических примесей из ствола скважин.

**Объект:** добывающие скважины, эксплуатирующие обводненные пласты, продукция которых содержит механические примеси. Интервал ниже приема насоса оборудован хвостовиком, предназначенным для увеличения скорости потока и обеспечения условий выноса пластовой воды и механических примесей.

**Цель:** обоснование оптимального диаметра хвостовика, обеспечивающего условия выноса пластовой воды и механических примесей с забоя скважин и соответственно минимальный перепад давления в стволе скважины ниже приема насоса.

**Результаты.** Исследовано влияние эксплуатационных параметров (обводненности, вязкости продукции, дебита) на формирование градиента давления в стволе скважины ниже приема насоса. Разработан расчетный метод определения диаметра хвостовика, обеспечивающего вынос воды и механических примесей с забоя обводненных нефтяных скважин, реализованный в виде компьютерной программы. Показано, что эффективность использования хвостовика с точки зрения выноса пластовой воды увеличивается по мере снижения обводненности, вязкости продукции и дебита скважины. Установлено, что по мере снижения дебита скважины по жидкости диаметр хвостовика, необходимый для выноса механических примесей, уменьшается.

### Ключевые слова:

Механическая модель, хвостовик, вынос пластовой воды, механические примеси, градиент давления, обводненность, гидравлические потери.

### Введение

Эксплуатация месторождений нефти и газа, в особенности на заключительном этапе разработки, ведется преимущественно механизированным способом и сопровождается рядом осложнений: снижение пластового давления и дебита добывающих скважин, обводнение продукции, отложение парафинов, неорганических солей, механических примесей в узлах внутрискважинного насосного оборудования [1, 2]. В частности, повышение обводненности продукции, обусловленное истощением залежей, закачкой пластовой воды в нагнетательные скважины для поддержания пластового давления в сочетании с низким дебитом приводит к накоплению пластовой воды в стволе скважин: обсадной колонне в интервале от приема насоса до забоя, нижнем конце колонны насосно-компрессорных труб, поскольку из-за разницы плотностей нефти и пластовой воды их относительная скорость возрастает. Накопление воды приводит к увеличению плотности смеси в стволе скважины и забойного давления, снижению депрессии на

пласт и дебита. Контакт пластовой воды с поверхностью обсадной колонны приводит к ее повышенной коррозии. Для обеспечения той же величины дебита для обводненной скважины требуется более низкий уровень жидкости над насосом (за счет наличия тяжелого столба жидкости в интервале от приема до пласта), следовательно, снижается давление на приеме насоса, что, в свою очередь, ведет к снижению коэффициента подачи штангового насоса, напорной характеристики электроцентробежного насоса [3–5].

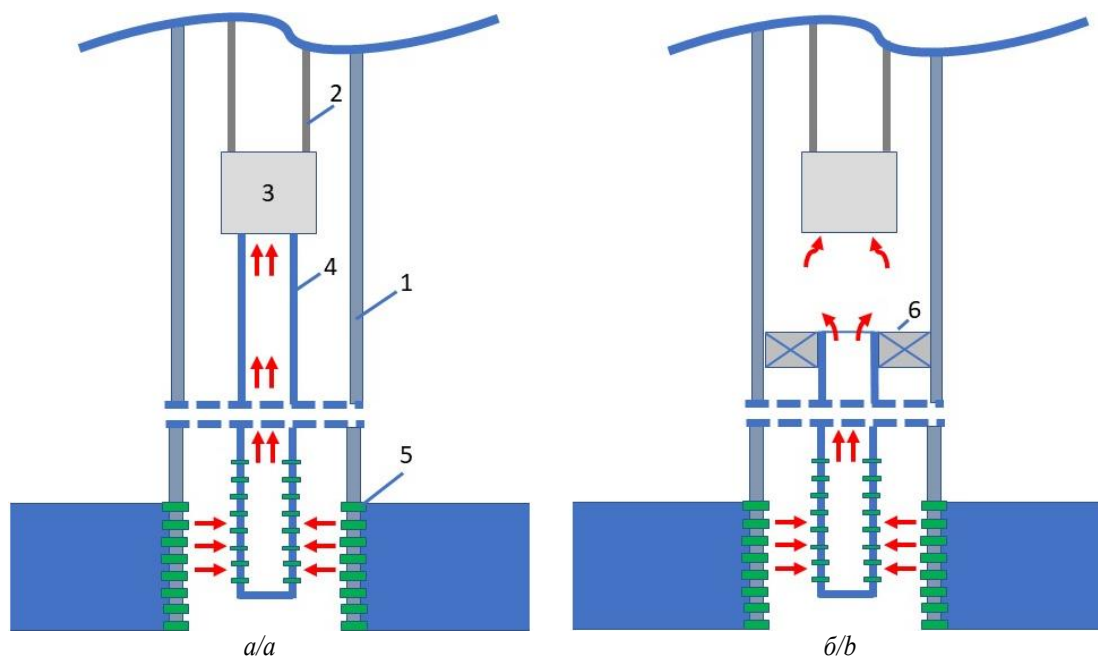
Таким образом, задача оптимизации условий выноса пластовой воды из ствола скважин является актуальной задачей, способствующей повышению рентабельности эксплуатации механизированного фонда. Для ее решения известны различные мероприятия и технические устройства, применяемые для увеличения скорости потока в трубах, ограничение притока воды из пласта, поступающей из подошвенной части, промывку скважин для очистки от песчаных пробок. Известны также технологии, включающие обработку призабойной зоны пласта поверхностно-активными веществами (ПАВ);

применение труб с гладким внутренним полимерным покрытием, способствующим снижению потерь давления на гидравлические сопротивления, устранение источников обводнения скважинной продукции (негерметичности обсадной колонны и цементного кольца), изоляцию водоносных пластов [6, 7].

Одной из перспективных технологий, широко применяемой при эксплуатации газовых скважин, является оборудование скважины в интервале ниже приема насоса (штангового или электроцентробежного) хвостовиком, диаметр которого ниже диаметра обсадной колонны. При равном дебите скважины скорость потока в хвостовике выше, чем в обсадной колонне, в результате улучшаются условия выноса капель жидкости потоком газа (рис. 1). На сегодняшний день предложено два конструктивных варианта его исполнения: в первом случае хвостовик герметично соединяется с приемом насоса (рис. 1, а), во втором хвостовик устанавливается ниже приема насоса, причем межтрубное пространство (кольцевое пространство между хвостовиком и обсадной колон-

ной) изолируется в верхней части хвостовика пакером, и часть свободного газа на приеме насоса сепарируется в затрубное пространство (рис. 2, б). Преимуществом схемы, приведенной на рис. 2, б, является снижение объемной доли свободного газа на приеме насоса, что актуально при откачке продукции с высоким газовым фактором [8].

Несмотря на широкую распространенность данной технологии, в настоящее время нет общепринятых критериев обоснования оптимального диаметра трубы меньшего диаметра. С одной стороны, по мере снижения диаметра хвостовика увеличивается скорость восходящего потока и соответственно повышается эффективность выноса пластовой воды. С другой стороны, при увеличении скорости смеси в трубе возрастают и гидравлические потери давления на трение. Для обоснованного расчета оптимальных геометрических параметров хвостовика необходимо детальное исследование особенностей движения газожидкостного потока в скважине с учетом взаимовлияния приведенных факторов.



**Рис. 1.** Конструкция скважины с хвостовиком: а) соединение хвостовика с приемом насоса; б) хвостовик с пакером; 1 – обсадная колонна, 2 – насосно-компрессорные трубы, 3 – погружной насос, 4 – хвостовик, 5 – интервал перфорации продуктивного пласта, 6 – пакер, красным показано направление потоков в скважине

**Fig. 1.** Construction of a well with a shank: a) connection of the shank with the pump intake; b) shank with the packer; 1 – casing, 2 – tubing, 3 submersible pump, 4 – shank, 5 – perforated interval of the reservoir, 6 – packer, the red shows the direction of the flow in the well

Известен ряд работ, посвященных исследованию движения многофазного газожидкостного потока в лифтовых/подъемных трубах и расчету перепада (градиента) давления в скважине с учетом наличия тяжелой фазы (жидкости, воды) в продукции скважины. Для расчета градиента давления по пути движения газожидкостной смеси широкое распространение получила зависимость

$$\frac{1}{\rho_l g} \frac{dp}{dz} = \frac{\rho_g}{\rho_l} + \frac{\lambda}{2} Fr^* + \Delta i, \quad (1)$$

где  $p$  – давление;  $\rho_g, \rho_l$  – плотность газа и жидкости соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\lambda$  – коэффициент трения;  $Fr^*$  – модифицированный параметр Фруда;  $\Delta i$  – дополнительный градиент давления, возникающий из-за наличия жидкости в потоке. В работах [9, 10] показано, что критерий Фруда является ключевым параметром газожидкостных потоков, определяющим, в частности, условия устойчивого выноса жидкости с забоя добывающих скважин. Для величины дополнительного градиента давления установлено, что он определяется, прежде всего, объ-

емным расходом жидкости и диаметром подъемной трубы.

Вопросы расчета критических параметров потока, в частности критической скорости, обеспечивающей вынос пластовой жидкости потоком газа, рассмотрены в работе [11]. Расчетный метод основан на определении скорости газа, превышающей конечную скорость падения капель жидкости в газовой среде, равной:

$$v_c = 1,8949 \left[ \frac{\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{0,25}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе газ-жидкость.

Следует отметить, что рассмотренные выше зависимости (1), (2) применимы главным образом для расчета параметров потока газовых скважин, продукция которых содержит в себе небольшое количество жидкости. Известны также экспериментальные исследования двухфазного течения смеси воды и керосина, проводимые для выявления закономерностей и условий выноса воды на поверхность при эксплуатации добывающих обводненных скважин [12]. Установлено, что полный вынос воды происходит при скоростях смеси, превышающих 0,12–0,15 м/с, причем критическая скорость выноса воды с забоя на поверхность близка к скорости оседания капель воды в жидкостном потоке. Так как реологические свойства нефти варьируются в зависимости от состава, пластового давления и температуры и отличаются от свойств керосина, данные значения могут быть использованы в качестве первого приближения для оценки критической скорости потока.

Исследование движения газонефтяного потока с учетом физико-химических свойств воды, нефти и газа для установления области рационального применения хвостовиков проведено в работе [13]. Рассмотрена задача определения критического дебита, при котором относительное движение компонентов не будет сказываться на величине удельного веса (плотности смеси) и условия движения многокомпонентного потока будут близки к идеальным. Показано, что удельный вес водонефтяной смеси  $\rho_f$  с учетом относительного движения можно рассчитать согласно зависимости

$$\rho_f = \rho_o + \frac{\rho_w - \rho_o}{2} \left[ 1 - \frac{1}{an} + \sqrt{\left(1 - \frac{1}{an}\right)^2 + \frac{4}{a}} \right],$$

$$n = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o}; \quad a = \frac{fC_s}{Q_w}, \quad (3)$$

где  $\rho_w, \rho_o$  – плотность воды и нефти соответственно;  $n$  – относительное объемное содержание воды в смеси;  $a$  – безразмерный коэффициент;  $Q_w, Q_o$  – дебит воды и нефти соответственно;  $f$  – площадь поперечного сечения лифтовых труб;  $C_s$  – относительная скорость нефти и воды. Известно, что плотность смеси в идеальном случае равна

$$\rho_f = \rho_o(1-n) + \rho_w n. \quad (4)$$

Приравняв выражения (3), (4), можно получить формулу для расчета критического дебита, которая имеет вид

$$Q_{cr} = \frac{fC_s}{(\rho_w - \rho_o) \left[ \frac{1-n}{\rho_w - k(\rho_o(1-n) + \rho_w n)} - \frac{n}{k(\rho_o(1-n) + \rho_w n) - \rho_o} \right]}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий степень отклонения плотности реальной смеси от идеальной. Обоснованный расчет коэффициента  $k$  требует дополнительных промысловых замеров давления в скважине, что является недостатком зависимости (5).

Для расчета многофазных газожидкостных потоков с заданным объемным расходом нефти, воды и газа в потоке широко применяются эмпирические корреляции (H.D. Beggs & J.P. Brill, H. Mukherjee & J.P. Brill, H.Jr. Duns & N.C.J. Ros и др.) и механистические модели (A.R. Hasan & C.S. Kabir, A.M. Ansari, A. Petalaz & K. Aziz и др.). Они позволяют учитывать эффекты проскальзывания (газа в жидкости, нефти и воде), режимы течения, причем наиболее точно характеристики потока прогнозируются с помощью механистических моделей, базирующихся на фундаментальных законах сохранения массы и импульса [14, 15]. В данной работе для расчета параметров многофазного потока используется механистическая модель потока дрейфа («drift-flux»). Достоинством модели является учет взаимного перемещения (проскальзывания) фаз, что позволяет учесть физические эффекты, наблюдаемые при образовании водяных «стаканов» на забое или в нижнем конце НКТ добывающих скважин.

#### Математическая модель

Расчет многофазного течения газожидкостного потока в интервале от кровли продуктивного пласта до приема погружного насоса проводится в рамках модели «drift-flux» [16]. Согласно модели, объемная доля газа и нефти с учетом относительного движения газа в потоке жидкости и нефти в потоке воды определяется согласно зависимостям:

$$H_g = \frac{V_{sg}}{C_g V_m + V_{sl-g}};$$

$$H_o = \frac{V_{so}}{C_o V_l + V_{sl-o}}, \quad (6)$$

где  $H_g, H_o$  – истинная объемная доля газа и нефти соответственно;  $V_{sg}, V_{so}$  – приведенная скорость газа и нефти соответственно;  $C_g, C_o$  – безразмерные поправочные коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения пузырьков газа и капель нефти в потоке;  $V_m, V_l$  – истинные скорости смеси и жидкости соответственно;  $V_{sl-g}, V_{sl-o}$  – скорость дрейфа пузырьков газа в жидкости и капель нефти в воде, причем относительная скорость подъема нефти в потоке в формуле (6) рассчитывается как

$$V_{sl\_o} = 1,53(1 - H_o)^2 (\cos \theta)^{0,5} \times \\ \times (1 + \sin \theta)^2 \left( \frac{\sigma_{ow} g (\rho_w - \rho_o)}{\rho_w^2} \right)^{1/4},$$

где  $\sigma_{ow}$  – поверхностное натяжение на границе нефть–вода;  $\theta$  – угол наклона оси скважины к вертикали.

Градиент давления в лифтовой трубе (обсадной колонне, хвостовике) определяется согласно формуле:

$$\frac{dp}{dz} = f_m \frac{\rho_m V_m^2}{2s} + \rho_m g \sin \alpha, \quad (7)$$

где  $f_m$  – коэффициент трения;  $\rho_m$  – плотность многофазной смеси с учетом проскальзывания фаз;  $s$  – гидравлический диаметр лифтовой трубы.

Одним из неблагоприятных факторов, осложняющих добычу нефти, является содержание в откачиваемой продукции взвешенных частиц механических примесей. Механические примеси являются одной из определяющих причин возникновения осложнений неисправностей в работе погружного оборудования [1, 3]. Для расчета скорости подъема (оседания) взвешенных в потоке частиц записывается уравнение баланса сил [17–19]:

$$\vec{F}_{gr} + \vec{F}_a + \vec{F}_d = 0,$$

где  $F_{gr}$ ,  $F_a$ ,  $F_d$  – соответственно сила тяжести, выталкивающая (архимедова) сила, сила сопротивления со стороны жидкости:

$$\vec{F}_{gr} = \frac{1}{6} \pi d_s^3 \rho_s \vec{g};$$

$$\vec{F}_a = \frac{1}{6} \pi d_s^3 \rho_m \vec{g};$$

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} C_d \rho_m S_{s/g} (\vec{V}_l - \vec{V}_s) |\vec{V}_l - \vec{V}_s|,$$

где  $\rho_s$ ,  $d_s$  – плотность и диаметр взвешенных частиц;  $C_d$  – коэффициент сопротивления;  $V_l$ ,  $V_s$  – вектор скорости жидкости и механических примесей соответственно.

Оптимальный диаметр хвостовика рассчитывается на базе критерия обеспечения минимального результирующего перепада давления, складывающегося из двух составляющих – силы тяжести газонефтеводной смеси, содержащей механические примеси, и гидравлических потерь на трение. При первоначальном снижении диаметра хвостовика относительно диаметра обсадной колонны перепад (градиент) давления снижается вследствие снижения плотности смеси благодаря увеличению скорости восходящего потока в хвостовике и обеспечению условий выноса пластовой воды. Однако при чрезмерном снижении диаметра хвостовика вследствие увеличения скорости потока возрастают гидравлические потери на трение, и перепад давления в скважине увеличивается. Нахождение оптимума (минимума) кривой зависимости градиента давления от диаметра хвостовика позволяет обеспечить минимальный перепад давления в обсадной колонне и максимизировать депрессию на

пласт и дебит скважины. Расчетный диаметр хвостовика, при котором достигается минимум перепада давления, определяется из решения уравнения, получаемого приравниванием к нулю производной градиента давления (7) по диаметру хвостовика:

$$s : \frac{d \left( f_m \frac{\rho_m V_m^2}{2s} + \rho_m g \sin \alpha \right)}{ds} = 0, \quad (8)$$

Изложенный метод реализован в виде компьютерной программы для расчета оптимального диаметра хвостовика, обеспечивающего вынос воды и механических примесей (8) с забоя добывающих обводненных скважин, с учетом конкретных условий эксплуатации.

#### Анализ результатов расчетов

Построены зависимости перепада давления в обсадной колонне ниже приема насоса (разницы между забойным давлением и давлением на приеме) от диаметра используемого хвостовика, и исследовано влияние эксплуатационных параметров (обводненности, вязкости продукции, дебита) на эффективность выноса пластовой воды. Правая граница диаметра хвостовика соответствует внутреннему диаметру обсадной колонны. В таблице приведена геометрия скважины и реологические свойства откачиваемой продукции, принятые при моделировании. В расчетном примере в первом приближении моделируется водонефтяной поток без учета влияния газа. Двухфазный поток нефти и воды реализуется в скважине в интервале ниже приема насоса при следующих условиях: давление на приеме превышает давление насыщения, небольшой газовый фактор нефти.

**Таблица.** Исходные данные

**Table.** Initial data

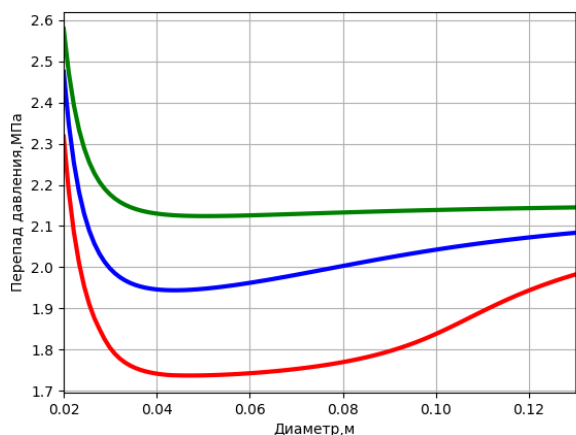
Глубина спуска насоса, м/Pump descent depth, m	1000
Глубина кровли пласта, м/Reservoir roof depth, m	1200
Внутренний диаметр обсадной колонны, мм Inner diameter of the casing string, mm	130
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup> /Oil density, kg/m <sup>3</sup>	800
Плотность воды, кг/м <sup>3</sup> /Water density, kg/m <sup>3</sup>	1100
Обводненность/Water cut, %	10–90
Плотность частиц механических примесей, кг/м <sup>3</sup> Density of particle of mechanical impurities, kg/m <sup>3</sup>	1500
Диаметр частиц механических примесей, мкм Diameter of particles of mechanical impurities, microns	1–500
Коэффициент продуктивности пласта, м <sup>3</sup> /(сут·МПа) Reservoir performance coefficient, m <sup>3</sup> /(day·MPa)	10
Пластовое давление, МПа/Reservoir pressure, MPa	12
Дебит жидкости, м <sup>3</sup> /сут./Liquid flow rate, m <sup>3</sup> /day	50–150
Давление на приеме, МПа/Intake pressure, MPa	5
Вязкость воды, мПа·с/Water viscosity, MPa·s	1
Вязкость нефти, мПа·с/Oil viscosity, MPa·s	2–30
Поверхностное натяжение, Н/м/Surface tension, N/m	0,05

Следует отметить, что наличие газа в продукции улучшает условия выноса пластовой воды: во-первых, поток выделяющегося из нефти и расширяющегося газа по мере подъема скважиной продукции способствует выносу пластовой воды, как и для газовых скважин; во-вторых, при разгазировании нефти



ее плотность и вязкость несколько возрастают, что приводит к снижению относительной скорости движения фаз (воды и нефти). Таким образом, расчетные значения оптимального диаметра хвостовика, полученные для условий двухфазного водонефтяного потока, могут рассматриваться как оценка «сверху», обеспечивающая условия выноса пластовой воды совместными потоками нефти и газа в трехфазном потоке.

С увеличением обводненности эффективность использования хвостовика закономерно снижается (рис. 2), поскольку пластовая вода непрерывно поступает в скважину из пласта, исключая ее полный вынос. При небольшой обводненности (10 %) использование хвостовика позволяет снизить противодавление на пласт на величину порядка 0,25 МПа, что соответствует увеличению дебита скважины по жидкости и нефти соответственно до 2,5 м<sup>3</sup>/сут и 1,8 т/сут (5 %).



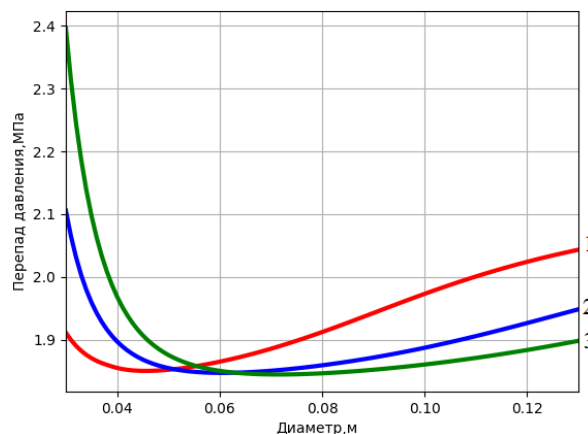
**Рис. 2.** Зависимость перепада давления в хвостовике от его диаметра, обводненности: 1 – 10 %, 2 – 50 %, 3 – 90 %

**Fig. 2.** Dependence of the pressure drop in the shank on its diameter, water content: 1 – 10 %, 2 – 50 %, 3 – 90 %

С увеличением дебита скважины по жидкости эффективность использования хвостовика снижается (рис. 3), поскольку с ростом дебита улучшаются условия выноса пластовой воды и в обсадной колонне. Оптимальное значение диаметра хвостовика увеличивается с ростом дебита, в частности, при увеличении дебита с 50 до 150 м<sup>3</sup>/сут. оптимальный диаметр хвостовика, обеспечивающий вынос пластовой воды, возрастает с 45 до 70 мм (на 55 %). Снижение эффективности хвостовика при увеличении вязкости нефти обусловлено ростом гидравлических потерь на трение при снижении его диаметра (рис. 4). При увеличении вязкости нефти от 2 до 30 мПа·с оптимальное значение диаметра хвостовика возрастает с 43 до 48 мм (на 12 %).

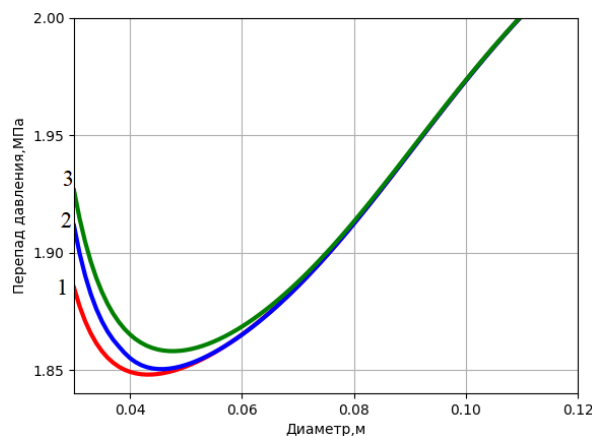
Следует отметить, что при работе скважины без хвостовика происходит процесс всплытия нефтяной фазы через столб пластовой воды, который накапливается на забое скважины, снижая депрессию на пласт. Оборудование скважины хвостовиком позволяет снизить относительную скорость фаз и создать

условия выноса пластовой воды вместе с нефтью. Известно [8], что критическая скорость нефти, необходимая для выноса стоячей жидкости всплывающим потоком нефти, в несколько раз меньше критической скорости, обеспечивающей вынос пластовой воды при совместном движении нефтяной и водяной фаз. Рассчитанный по предложенному методу диаметр хвостовика обеспечивает скорость нефтяной фазы, достаточную для выноса движущейся воды в откачиваемой продукции, следовательно, обеспечивает и вынос стоячей воды с забоя скважины.



**Рис. 3.** Зависимость перепада давления в хвостовике от его диаметра, дебиты: 1 – 50 м<sup>3</sup>/сут., 2 – 100 м<sup>3</sup>/сут., 3 – 150 м<sup>3</sup>/сут.

**Fig. 3.** Dependence of the pressure drop in the shank on its diameter, flow rates: 1 – 50 m<sup>3</sup>/day, 2 – 100 m<sup>3</sup>/day, 3 – 150 m<sup>3</sup>/day

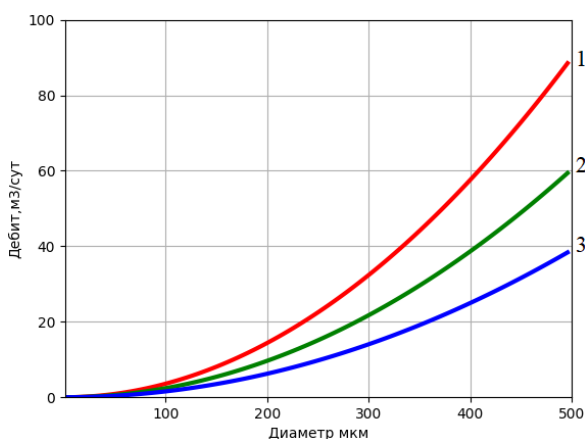


**Рис. 4.** Зависимость перепада давления в хвостовике от его диаметра, вязкость нефти: 1 – 2 мПа·с, 2 – 10 мПа·с, 3 – 30 мПа·с

**Fig. 4.** Dependence of the pressure drop in the shank on its diameter, oil viscosity: 1 – 2 mPa·s, 2 – 10 mPa·s, 3 – 30 mPa·s

На графиках (рис. 5) показана величина минимального дебита скважины, требуемого для подъема частиц механических примесей заданного диаметра в обсадной колонне внутренним диаметром 130 мм, обводненность жидкости принята 30 %. Из графиков видно, что для скважин, эксплуатируемых установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), дебит ко-

торых, как правило, превышает 30–40 м<sup>3</sup>/сут., механические примеси, размер которых колеблется в интервале 1–250 мкм, будут подниматься вместе с потоком. При откачке нефти вязкостью 2 мПа·с для подъема крупных частиц механических примесей диаметром 400–500 мкм дебит скважины по жидкости должен превышать 60 м<sup>3</sup>/сут, в противном случае возможно образование застойных зон в интервале ниже приема насоса с повышенной концентрацией механических примесей, накапливающихся вследствие недостаточной скорости потока. Для исключения этого явления рационально оборудовать интервал от приема насоса до забоя хвостовиком.



**Рис. 5.** Минимальный дебит скважины, требуемый для подъема частиц механических примесей заданного диаметра (вязкость нефти: 1 – 2 мПа·с, 2 – 5 мПа·с, 3 – 10 мПа·с)

**Fig. 5.** Minimum well flow rate required for lifting particles of mechanical impurities of a given diameter (oil viscosity: 1 – 2 mPa·s, 2 – 5 mPa·s, 3 – 10 mPa·s)

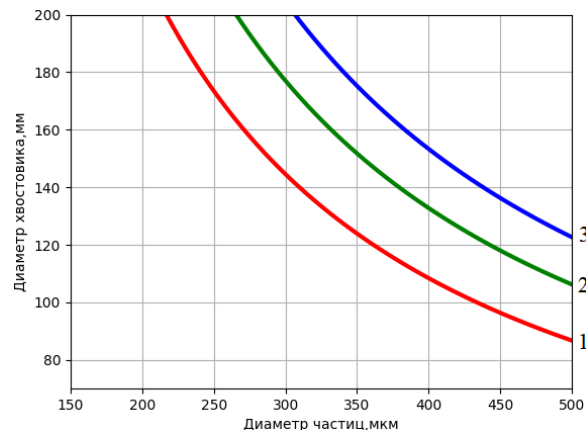
Полагая, что коэффициент сопротивления потока движению механических примесей  $C_d$  подчиняется закону Стокса [20], можно получить следующее выражение для расчета диаметра хвостовика, обеспечивающего вынос механических примесей размером  $d_s$ :

$$s = \sqrt{\frac{72Q_m\mu_m}{\pi g(\rho_s - \rho_m)d_s^2}}, \quad (9)$$

где  $\mu_m$  – вязкость смеси;  $Q_m$  – дебит жидкости. На графиках (рис. 6) показаны результаты расчета диаметра хвостовика по формуле (9) при различном дебите жидкости (при моделировании принято  $\mu_m=2$  мПа·с,  $\rho_m=1050$  кг/м<sup>3</sup>).

С увеличением дебита жидкости интенсивность выноса механических примесей увеличивается, в частности, при дебите 80 м<sup>3</sup>/сут. и более осуществляется вынос практически всех фракций механических примесей (диаметром до 470 мкм) даже в обсадной колонне. При дебите 60 м<sup>3</sup>/сут. использование хвостовика диаметром 106 мм позволяет исключить

накопление на забое и обеспечить вынос наиболее крупных частиц (диаметром до 500 мкм), при дебите 40 м<sup>3</sup>/сут. расчетный диаметр хвостовика составляет 87 мм. Таким образом, по мере снижения дебита скважины необходимый для выноса механических примесей диаметр хвостовика также уменьшается.



**Рис. 6.** Диаметр хвостовика, требуемый для подъема частиц механических примесей заданного диаметра (дебит по жидкости: 1 – 40 м<sup>3</sup>/сут., 2 – 60 м<sup>3</sup>/сут., 3 – 80 м<sup>3</sup>/сут.)

**Fig. 6.** Shank diameter required for lifting particles of mechanical impurities of a given diameter (flow rate: 1 – 40 m<sup>3</sup>/day, 2 – 60 m<sup>3</sup>/day, 3 – 80 m<sup>3</sup>/day)

## Выводы

1. Разработан и обоснован метод расчета диаметра хвостовика, спускаемого в скважину ниже приема погружного насоса, обеспечивающего вынос воды и механических примесей с забоя обводненных нефтяных скважин. Метод расчета оптимального диаметра хвостовика, учитывающий конкретные скважинные условия, реализован в виде компьютерной программы.
2. Проанализировано влияние эксплуатационных параметров (обводненности, вязкости продукции, дебита) на эффективность выноса пластовой воды. Показано, что эффективность использования хвостовика увеличивается по мере снижения обводненности, вязкости продукции и дебита скважины, причем при оптимальном диаметре хвостовика достигается увеличение дебита скважины по жидкости и нефти до 5 %.
3. Исследованы особенности выноса механических примесей с забоя скважин: установлено, что при дебитах более 80 м<sup>3</sup>/сут. осуществляется вынос механических примесей практически всех фракций (размером до 470 мкм) в обсадной колонне (диаметром 130 мм). По мере снижения дебита до 40 м<sup>3</sup>/сут. необходимый для выноса механических примесей диаметр хвостовика уменьшается до 87 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по добыче нефти / К.Р. Уразаков, Э.О. Тимашев, В.А. Молчанова, М.Г. Волков. – Пермь: Астер Плюс, 2020. – 600 с.
2. Диагностирование технического состояния электроцентробежных насосных установок по уровню их вибрации / К.Р. Уразаков, Е.Б. Думлер, А.С. Топольников, Р.И. Вахитова // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т. 15. – № 1. – С. 103–107.

3. Takacs G. Electrical submersible pumps manual. – Houston, Texas: Gulf Professional Publ., 2017. – 578 p.
4. Уразаков К.Р., Тимашев Э.О., Молчанова В.А. Моделирование работы погружных плунжерных насосных установок с пневмокомпенсаторами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 51–59.
5. Тимашев Э.О., Уразаков К.Р. Гидродинамика газожидкостного потока в насосных трубах штанговых установок // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 125–133.
6. Якупов Р.Р., Яржева Н.Р. Оптимизация работы газовых скважин на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 41–49.
7. Исследование температурного поля в скважине с индукционным нагревом колонны при наличии каналов заколонного перетока жидкости / Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, В.Я. Федотов, Д.В. Космылин, И.В. Канафин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 17–28.
8. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М.: ИЦ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. – 448 с.
9. Николаев О.В., Соколов В.А. Методика расчета технологических параметров вертикальных газовых скважин, продукция которых содержит жидкость // Вести газовой науки. – 2016. – № 2 (26). – С. 84–90.
10. Полуэмпирическая модель для расчета потерь давления в стволе вертикальной газовой скважины, работающей с выносом жидкости / В.А. Соколов, О.В. Николаев, И.В. Стоноженко, А.Г. Банникова // Вести газовой науки. – 2018. – № 1 (33). – С. 151–158.
11. Guidelines for the proper application of critical velocity calculations / R.P. Sutton, S.A. Cox, J.F. Lea, O.L. Rowlan // Society of Petroleum Engineers. – 2010. – V. 25. – № 2. – P. 182–194.
12. Технология механизированной добычи нефти / Н.Н. Репин, В.В. Девликамов, О.М. Юсупов, А.И. Дьячук. – М.: Недра, 1976. – 176 с.
13. Эксплуатация глубинно-насосных скважин / Н.Н. Репин, В.Р. Еникеев, О.М. Юсупов, Ю.Г. Валишин, А.В. Марков-Осоргин. – М.: Недра, 1971. – 168 с.
14. Brill J.P., Mukherjee H.K. Multiphase flow in wells. – Richardson, Texas: SPE, 1999. – 164 p.
15. Petalas N., Aziz K. A mechanistic model for multiphase flow in pipes // Petroleum Society of Canada. – 1998. – № 1. – P. 1–22.
16. Drift-flux parameters for threephase steady-state flow in wellbores / H. Shi, J. Holmes, L. Diaz, L.J. Durlafsky, K. Aziz // SPE Journal. – 2005. – V. 10. – № 2. – P. 130–137.
17. Yang Y., Peng H., Wen Ch. Sand transport and deposition behaviour in subsea pipelines for flow assurance // Energies. – 2019. – V. 21. – № 12. – P. 1–12.
18. On the numerical simulation of sand transport in liquid and multiphase pipelines / M. Leporinia, A. Terenzi, B. Marchetti, F. Corvaro, F. Polonara // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 175. – P. 519–535.
19. Viscosity effects on sand flow regimes and transport velocity in horizontal pipelines / E. Zorgani, H. Al-Awadi, W. Yan, S. Al-Lababid, H. Yeung, C.P. Fairhurst // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – V. 92. – P. 89–96.
20. Лугуманов Т.Т., Кулешов В.С. К моделированию динамики системы флюид – дисперсная среда // Труды Института механики имени Р.Р. Мавлютова Уфимского Научного центра Российской Академии Наук. – 2014. – № 10. – С. 66–72.

Поступила 12.02.2021 г.

#### Информация об авторах

**Уразаков К.Р.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Алиматов Ш.А.**, инженер-технолог, «Когалымнефтегаз», ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь».

**Тугунов П.М.**, ассистент кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.279

## INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF REMOVING WATER AND MECHANICAL IMPURITIES FROM THE BOTTOM OF OIL WELLS

**Kamil R. Urazakov<sup>1</sup>,**  
Urazakk@mail.ru

**Shamil A. Alimetov<sup>2</sup>,**  
felix8047@mail.ru

**Pavel M. Tugunov<sup>1</sup>,**  
PavelTugunov@gmail.com

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

<sup>2</sup> «Kogalymneftegaz», «LUKOIL – Western Siberia» LLC,  
20, Pribaltiyskaya street, Kogalym, 628486, Russia.

**Relevance.** To date, the exploitation of a significant share of oil fields is mechanized and is accompanied by a number of complications due to the decline in production rate wells, irrigation products, corrosion, and deposition of mechanical impurities in the components of the pumping equipment. The accumulation of reservoir water and mechanical impurities in the wellbore leads to the increase in the mixture density in the well, decrease in reservoir depression and flow rate, and growth in the rate of casing corrosion wear. In this regard, one of the most urgent tasks of cost-effective well operation is to ensure the conditions for removal of reservoir water and mechanical impurities from the well bore.

**Object:** producing wells that exploit watered formations, the products of which contain mechanical impurities. The interval below the pump intake is equipped with a shank designed to increase the flow rate and provide conditions for removal of reservoir water and mechanical impurities.

**The purpose** of the research is to substantiate the optimal diameter of the shank, which provides conditions for removal of reservoir water and mechanical impurities from the bottom of wells and, accordingly, the minimum pressure drop in the wellbore below the pump intake.

**Results.** The influence of operational parameters (water cut, product viscosity, flow rate) on the formation of a pressure gradient in the wellbore below the pump intake is studied. The authors have developed a computational method for determining the diameter of the shank, which ensures the removal of water and mechanical impurities from the bottom of waterlogged oil wells, implemented in the form of a computer program. It is shown that the efficiency of the shank use in terms of reservoir water removal increases as the water cut, the viscosity of the product and the flow rate of the well decrease. It is found that as the well flow rate decreases in the liquid, the diameter of the shank, which is necessary for removal of mechanical impurities, decreases.

### Key words:

Mechanical model, shank, reservoir water removal, mechanical impurities, pressure gradient, water cut, hydraulic losses.

### REFERENCES

1. Urazakov K.R., Timashev E.O., Molchanova V.A., Volkov M.G. *Spravochnik po dobyche nefii* [Handbook on oil extraction]. Perm, Aster Plyus Publ., 2020. 600 p.
2. Urazakov K.R., Dumler E.B., Topolnikov A.S., Vakhitova R.I. Diagnostics of the technical condition of electric center-bearing pumping units by the level of their vibration. *Petroleum Engineering*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 103–107. In Rus.
3. Takacs G. *Electrical submersible pumps manual*. Houston, Texas, Gulf Professional Publishing, 2017. 578 p.
4. Urazakov K.R., Timashev E.O., Molchanova V.A. Simulation of operation of downhole plunger pumping installations with pneumatic compensators. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 51–59. In Rus.
5. Timashev E.O., Urazakov K.R. Hydrodynamics of gas-liquid flow in the tubing of rod pump installations. *Petroleum Engineering*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 125–133. In Rus.
6. Yakupov R.R., Yargeeva N.R. Optimization of gas wells operation at the Yamburg gas field. *Petroleum Engineering*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 41–49. In Rus.
7. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Fedotov V.Ya., Kosmylin D.V., Kanafin I.V. Study of the temperature field in a well with induction heating of the column in the presence of channels of the back-water flow of liquid. *Bulletin of the Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, and energy*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 17–28. In Rus.
8. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefi* [Borehole oil production]. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ. Center, 2015. 448 p.
9. Nikolaev O.V., Sokolov V.A. Methodology for calculating the technological parameters of vertical gas wells, the products of which contain liquid. *News of gas science*, 2016, no. 2, pp. 84–90. In Rus.
10. Sokolov V.A., Nikolaev O.V., Stonozhenko I.V., Bannikova A.G. Semi-empirical model for calculating pressure losses in the trunk of a vertical gas well operating with liquid removal. *News of gas science*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 151–158.
11. Sutton R.P., Cox S.A., Lea J.F., Rowlan O.L. Guidelines for the proper application of critical velocity calculations. *Society of Petroleum Engineers*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 182–194.
12. Repin N.N., Devlikamov V.V., Yusupov O.M., Dyachuk A.I. *tehnologiya mekhanizirovannoy dobychi nefi* [Technology of mechanized oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 176 p.
13. Repin N.N., Enikeev V.R., Yusupov O.M., Valishin Yu.G., Markov-Osorgin A.V. *Ekspluatatsiya glubimno-nasosnykh skvazhin* [Exploitation of deep-pump wells]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 168 p.
14. Brill J.P., Mukherjee H.K. *Multiphase flow in wells*. Richardson, Texas, SPE, 1999. 164 p.
15. Petalas N., Aziz K. A mechanistic model for multiphase flow in pipes. *Petroleum Society of Canada*, 1998, no. 1, pp. 1–22.
16. Shi H., Holmes J., Diaz L., Durllofsky L.J., Aziz K. Drift-flux parameters for three-phase steady-state flow in wellbores. *SPE Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 130–137.

17. Yang Y., Peng H., Wen Ch. Sand transport and deposition behaviour in subsea pipelines for flow assurance. *Energies*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 1–12.
18. Leporinia M., Terenzi A., Marchetti B., Corvaro F., Polonara F. On the numerical simulation of sand transport in liquid and multiphase pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 519–535.
19. Zorgani E., Al-Awadi H., Yan W., Al-Lababid S., Yeung H., Fairhurst C.P. Viscosity effects on sand flow regimes and transport velocity in horizontal pipelines. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, vol. 92, pp. 89–96.
20. Lugumanov T.T., Kuleshov V.S. On modeling the dynamics of the fluid – dispersed medium system]. *Proceedings of the R.R. Mavlyutov Institute of mechanics of the Ufa Scientific center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, no. 10, pp. 66–72. In Rus.

*Received: 12 February 2021.*

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

**Kamil R. Urazakov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Shamil A. Alimetov**, process engineer, TPP «Kogalymneftegaz», «LUKOIL – Western Siberia» LLC.

**Pavel M. Tugunov**, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 622. 322

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА ФИЛЬТРАЦИОННЫМ ПОТОКОМ ПЛАСТОВОЙ ЖИДКОСТИ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРОБКООБРАЗОВАНИЯ В СКВАЖИНЕ

Хабибуллин Марат Яхиевич,  
m-hab@mail.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Октябрьский,  
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54-а.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью предотвратить разрушение пласта вблизи забоя скважин и появлением большого количества песка в пластовой жидкости при ее фильтрации в призабойную зону скважины. Решение этой проблемы позволит улучшить работу фильтрации пластовой жидкости из пласта в скважину и сократить затраты на дополнительное применение методов интенсификации притока пластовой жидкости к скважине.

**Цель:** разработать и предложить методику, позволяющую во время эксплуатации скважин, склонных к пробкообразованию, ограничивать депрессию пластового давления предельно допустимой величиной, при которой материал прифилтровой зоны находится в упругом состоянии по всему объему.

**Объекты.** Для определения напряженного состояния на этом участке колонны необходимо данный элемент представить в виде полого шара, который опирается на обсадную колонну. Когда снижается гидравлическое давление в материале пористой среды для процесса фильтрации пластовой жидкости, она будет расширяться при отсутствии препятствий протеканию этому процессу. Одновременно происходит повышение давления пластовой жидкости снаружи полого шара. Поэтому необходимо найти закономерности, происходящие при расширении–сжатии пористой среды в процессе фильтрации пластовой жидкости через полый шар.

**Методы.** Наибольшая разность нормальных напряжений возникает на стенке скважины, поскольку при этом радиальные напряжения равны минимальному, а тангенциальные – максимальному значениям. Поэтому в зависимости от депрессии пластового давления и прочностных свойств закрепленной зоны возможны следующие условия эксплуатации скважины: закрепленная прискважинная часть пласта по всему объему находится в упругом состоянии; закрепленная прискважинная часть пласта по всему объему находится в пластическом состоянии. Из решения упругой задачи известно, что наибольшая разность нормальных напряжений в теле полого шара при фильтрации жидкости через его стенку к центру имеет место на внутренней поверхности, поэтому условия текучести материала шара возникнут, прежде всего, на внутренней поверхности шара. Пользуясь решением упругой задачи с учетом сжимаемости породы можно определить величину перепада давления на пласт, исключая возможность пластического течения пластового материала, то есть допустимый перепад давления.

**Результаты.** При эксплуатации скважин, склонных к пробкообразованию, необходимо ограничивать депрессию пластового давления предельно допустимой величиной, когда материал прифилтровой зоны находится в упругом состоянии по всему объему. Таким образом, максимальная разность главных нормальных напряжений наблюдается на стенке скважины, поэтому для предотвращения разрушения пласта вблизи забоя необходимым условием является соответствие прочностных свойств горных пород напряжениям, действующим в этой зоне.

### Ключевые слова:

Деформация, интенсивность, радиус, толщина, скважина, пласт.

### Введение

При исследовании механизма разрушения пласта фильтрационным потоком пластовой жидкости не учитывается такое явление, как длительное деформирование породы с потерей прочности. Этот фактор влияет на уменьшение долговечности материала за обсадной колонной скважин, длительность работы эксплуатационной скважины без поступления песка из пласта [1–3]. Отсюда возникает необходимость в рассмотрении вопросов, связанных с упругими и пластическими напряжениями в элементах пористой среды в затрубном пространстве в области перфорационных отверстий при фильтрации пластовой жидкости. Для определения напряженного состояния на этом участке колонны необходимо данный элемент представить в виде полого шара, который опирается на обсадную колонну. Когда снижается гидравлическое давление в материале пористой среды для процесса фильтрации пластовой жидкости, она будет расширяться при от-

сутствии препятствий протеканию этому процессу. Одновременно происходит повышение давления пластовой жидкости снаружи полого шара. Поэтому необходимо найти закономерности, происходящие при расширении–сжатии пористой среды в процессе фильтрации пластовой жидкости через полый шар.

### Методология

Наибольшая разность нормальных напряжений возникает на стенке скважины, поскольку при этом радиальные напряжения равны минимальному, а тангенциальные – максимальному значениям [4–6]. Поэтому в зависимости от депрессии пластового давления и прочностных свойств закрепленной зоны возможны следующие условия эксплуатации скважины:

- закрепленная прискважинная часть пласта по всему объему находится в упругом состоянии, то есть выполняется условие по формуле (1)

$$\sigma_{ra} - \sigma_{\theta a} = \sigma_s; \quad (1)$$

- закреплённая прискважинная часть пласта по всему объёму находится в пластическом состоянии, то есть выполняется условие согласно (2)

$$\sigma_{rb} - \sigma_{\theta b} = \sigma_s, \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести.

Из решения упругой задачи известно, что наибольшая разность нормальных напряжений в теле полого шара при фильтрации жидкости через его стенку к центру имеет место на внутренней поверхности ( $r = a$ ) [7]. Поэтому условия текучести материала шара возникнут, прежде всего, на внутренней поверхности шара, что можно записать как (3):

$$\sigma_{ra} - \sigma_{\theta a} = \sigma_s, \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести материала шара при напряжении сжатия;  $\sigma_{ra}$  и  $\sigma_{\theta a}$  – нормальные напряжения, радиальное и тангенциальное соответственно.

Пользуясь этим выражением и решением упругой задачи с учётом сжимаемости породы можно определить величину перепада давления на пласт, исключая возможность пластического течения пластового материала, то есть допустимый перепад давления  $P_{ag}$  [8].

Принимая во внимание, что  $\sigma_{ra} = 0$ , можно записать так (4):

$$-\sigma_{\theta a} = \frac{\sigma_s}{z}, \quad (4)$$

где  $z$  – запас прочности;  $\sigma_{\theta a}$  – нормальное тангенциальное напряжение, определяемое из [9] при  $r = a$ .

Учитывая, что в зернистом цементном материале с «вязким» цементом напряжения, вызванные неравномерным гидравлическим сжатием упругой составляющей материала, могут прелаксировать, в формуле (4) следует пренебречь этой составляющей, то есть принять  $\alpha = \omega = 0$  ( $\chi = -1$ ). Примем также равным нулю неизвестное внешнее контактное напряжение сжатия  $\sigma_{rb}$ . Тогда нормальное тангенциальное напряжение сжатия на внутренней поверхности шара приближенно будет (приняв  $\frac{b}{a} \geq 1$ ) равно (5)

$$\sigma_{ba} = \frac{1+v}{1-v} \cdot (P_a - P_b), \quad (5)$$

или, ограничивая это напряжение допустимой величиной  $\frac{\sigma_s}{z}$ , запишем согласно (6):

$$\frac{\sigma_s}{z} = \frac{1+v}{1-v} \cdot (P_a - P_b). \quad (6)$$

Распределение давления жидкости в стенке полого шара при фильтрации по (7):

$$P = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a}{r} \right) \cdot \left( 1 - \frac{a}{b} + \frac{naK_1}{hK_2} \ln \frac{R_k}{r_c+b} \right)^{-1} \right] \cdot P_a, \quad (7)$$

где  $a$  – радиус перфорированного отверстия, м;  $b$  – толщина фильтровой зоны, м;  $n$  – число перфорационных отверстий в колонне;  $h$  – мощность вскрытой перфорацией части пласта, м;  $K_1$  – проницаемость фильтровой зоны, м<sup>2</sup>;  $K_2$  – проницаемость пласта, м<sup>2</sup>;  $R_k$  – радиус контура питания, м;  $r_c$  – радиус скважины, м;  $P_a$  – полный перепад давления на пласт и фильтр, МПа.

Тогда выражение для определения допустимого перепада давления на пласт запишется так (8):

$$P_{ad}^y = \frac{\sigma_s}{z} \cdot \frac{1-v}{1+v} \cdot \left( 1 + \frac{nbK_1}{hK_2} \cdot \ln \frac{R_k}{r_c+b} \right). \quad (8)$$

Рассмотренный метод расчета величины допустимой депрессии на пласт базируется на результатах кратковременных определений механических свойств материала фильтра, а именно величины предела текучести  $\sigma_s$ , и, очевидно, не отвечает на вопрос о долговечности фильтра [10].

Известно, что все горные породы могут деформироваться во времени при разности напряжений  $\sigma_r - \sigma_{\theta}$  меньшей  $\sigma_s$ . И если цементирующий материал в породе течет, теряя свои свойства, то цементированная порода будет терять свойства по мере развития пластических деформаций. Поэтому за другой критерий прочности, скорее долговечности, горной породы за колонной в скважине может быть принята скорость ее пластического течения или предельная величина относительной деформации [11].

При длительном наблюдении за деформацией горной породы, находящейся в «упругом» состоянии в обычном понимании, можно наблюдать ее деформацию во времени. В связи с этим нет смысла решать смешанную задачу о напряженном состоянии горной породы, когда имеет место внешняя ее зона, находящаяся в упругом состоянии, и внутренняя зона, в пределах которой материал в состоянии пластического течения, которое, очевидно, невозможно теоретически из-за наличия упругой зоны. Тем не менее деформация во времени возможна и в этом случае. Поэтому рассмотрим предельный случай, когда полый шар по всему сечению испытывает состояние пластического течения [12].

Известно, что в упругом полом шаре при фильтрации жидкости к его центру при снижении давления в его полости напряжения в стенке шара по всему сечению однозначны – отрицательны (напряжения сжатия), причем в соотношении  $|\sigma_{\theta}| \geq |\sigma_r|$ . В связи с этим для зоны пластичности справедливо следующее условие текучести материала (9):

$$\sigma_r - \sigma_{\theta} = +\sigma_s. \quad (9)$$

Знак плюс перед  $\sigma_s$  в уравнении (9) взят из решения [13], так как разность  $\sigma_r - \sigma_{\theta}$  при переходе материала из упругого состояния в состояние пластического течения, очевидно, не изменится.

Нужно полагать, что предел текучести для зернистого материала снижается по мере развития пластических деформаций. В первом приближении этот параметр прочности примем линейно-снижающимся по мере развития пластической деформации по (10):

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \cdot (1 - \eta_{\sigma} \bar{\epsilon}), \quad (10)$$

где

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{(\epsilon_r^n - \epsilon_{\theta}^n)^2 + (\epsilon_r^n - \epsilon_z^n)^2},$$

$$\epsilon_r^n = \frac{du^n}{dr}, \quad \epsilon_{\theta}^n = \epsilon_z^n = \frac{u^n}{r}.$$

Несомненно, в условиях пластического течения материала эффектом сжимаемости, вызванным действием гидростатического давления, можно прене-

бречь, так как эти напряжения релаксируют, и, кроме того, упругая деформация составляет незначительную долю деформации в последующем [14]. Примем также, что при пластическом течении зернистый цементированный материал сохраняет постоянный объем, то есть (11)

$$\Delta = \frac{du^n}{dr} + 2 \frac{u^n}{r} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r^2 u^n). \quad (11)$$

Отсюда получается (12)

$$u^n = \frac{c}{r^2}, \varepsilon_r^n = -2 \frac{c}{r^3}, \varepsilon_\theta^n = \frac{c}{r^3}. \quad (12)$$

Из граничного условия  $r = a$ ,  $u^n = u_a^n$  находим  $c = a^2 \cdot u_a^n$ .

Подставляя  $\varepsilon_r^n$  и  $\varepsilon_\theta^n$  из (12) в (11), получим выражение интенсивности деформации сдвига при пластическом течении по (13):

$$\varepsilon = \varepsilon_a^n \cdot \frac{a^3}{r^3}, \varepsilon_a^n = 2\sqrt{3} \cdot \frac{u_a^n}{a}. \quad (13)$$

Уравнение равновесия напряженной пористой среды для изотропного полого шара имеет вид (14):

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \chi \cdot \frac{dP}{dr}. \quad (14)$$

Подставляя в него (9), (10) и (13) при  $\chi = -1$ , получим (15)

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{\sigma_{so}}{r} \cdot \left(1 - \eta_\theta \varepsilon_a^n \cdot \frac{a^3}{r^3}\right) + \frac{dP}{dr} = 0. \quad (15)$$

Величина градиента давления определяется как (16):

$$\frac{dP}{dr} = \frac{q\mu_{ж}}{2\pi a K_1} \cdot \frac{1}{K^2}. \quad (16)$$

Подставляя это значение в (15), после интегрирования при граничном условии  $r=a_1$ ,  $P=P_a$ ,  $\sigma_r=0$ , получим (17), (18):

$$\sigma_r = P_a - P - 2\sigma_{so} \cdot [f(r) - f(a)], \quad (17)$$

$$f(r) = \frac{1}{\sigma_{so}} \cdot \int_0^r \frac{\sigma_s}{r} dr = \ln r + \frac{1}{3} \eta_\theta \varepsilon_a^n \cdot \frac{a^3}{r^3} + c, \quad (18)$$

где  $b \geq r \geq a$ ,  $\sigma_\theta = \sigma_r - \sigma_s$

Входящую в уравнение (17) разность  $P_a - P$  находим как (19)

$$P_a - P = \frac{Q_{ж\mu_{ж}}}{2\pi a K_1} \cdot \left(1 - \frac{a}{r}\right). \quad (19)$$

Подставляя (19) в (17) и используя граничное условие  $r = b$ ,  $P = P_b$ ,  $\sigma_r = \sigma_{rb}$ , получим формулу предельного соотношения между критическим дебитом нефти и предельным напряженным состоянием материала горной породы, соответствующим пластическому течению ее по всему сечению полого шара (20):

$$\frac{Q_{ж\mu_{ж}}}{2\pi a K_1} \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right) = 2\sigma_{so} \cdot [f(b) - f(a)] - \sigma_{rb}. \quad (20)$$

Полученную зависимость (20) можно рассматривать как критериальное уравнение. Пользуясь этой зависимостью, можно определить допустимый дебит нефти или перепад давления на пласт, обеспечивающие нормальную эксплуатацию скважины и устойчивость материала пласта за колонной [15]. Для определения допустимых значений дебита или перепада давления воспользуемся известным параметром – коэффициентом запаса прочности  $z$ . Подставляя допустимое значение предела текучести по формуле (21)

$$|\sigma_{so}| = \frac{\sigma_{so}}{z} \quad (21)$$

в формулу (20) и заменяя расход  $Q_{ж}$  соответствующим значением перепада давления из (19), получим формулу для расчета допустимого перепада давления на пласт (22)

$$P_{ad}^n = \left[2 \frac{\sigma_{so}}{z} (f_b - f_a) - \sigma_{rb}\right] \left(\frac{b}{a} + \frac{nb^2 K_1}{(b-a) \cdot h K_2} \ln \frac{R_k}{r+b_c}\right). \quad (22)$$

Для ориентировочных расчетов примем  $\sigma_{rb} = 0$ ,  $\eta_\theta \cdot \varepsilon_a^n = 1$  и пренебрежем величиной  $\frac{b}{a}$  по сравнению с единицей. Формула (22) примет вид (23):

$$P_{ad}^n \approx 2 \frac{\sigma_{so}}{z} \cdot \left(1 + \frac{naK_1}{nK_2} \cdot \ln \frac{R_k}{r_c+b}\right) \cdot \frac{b}{a} \ln \frac{b}{a}. \quad (23)$$

Условие  $\eta_\theta \varepsilon_a^n = 1$  соответствует случаю, когда материал теряет прочность на стенке полого шара ( $r = a$ ) по достижении деформации течения предельных значений. Дальнейшая деформация горной породы будет сопровождаться ее разрушением, выкрашиванием зернистого материала во времени. В связи с этим вопрос о долговечности горной породы за колонной будет определяться скоростью «истечения» ее через перфорационное отверстие, что требует специальных длительных исследований текучести материала в условиях, близких к реальным [16].

Сравнивая величину допустимого перепада давления на пласт, полученного из условия  $-\sigma_\theta = \frac{\sigma_s}{z}$  при  $r = a$ , когда материал полого шара по всему сечению находится в упругом состоянии, с величиной допустимого перепада давления, полученной для случая, когда материал полого шара по всему сечению находится в состоянии пластического течения, можно видеть, что в первом случае величина допустимого перепада давления на пласт  $P_{od}^y$  в десятки раз меньше, чем во втором случае  $P_{od}^y$ . Эту минимальную величину  $P_{od}^y$ , по-видимому, и следует принимать за допустимую при эксплуатации скважин, что должно обеспечить наибольшую долговечность фильтра за колонной, материал которого склонен к пластическим деформациям. При этом запас прочности  $z$  может быть принят равным единице [17]. В дальнейшем эта величина может быть уточнена по результатам промысловых исследований и внедрения способов крепления призабойной зоны скважин.

Следует иметь в виду, что значение  $P_{od}^y$  рассчитывается на основе величины предела текучести породы  $\sigma_s$ , определяемой путем кратковременных исследований механических свойств материала. Поэтому для достижения устойчивости призабойной части пласта к разрушению необходимо соответствие прочностных свойств консолидированной породы (а именно предела текучести) действующей в этой области максимальной разности нормальных напряжений. Однако при этом не исключается, что закрепленная зона пласта вблизи забоя скважины начнет разрушаться через некоторое время после проведения процесса консолидации. Это может быть обусловлено такими факторами снижения прочности породы, как развитие ползучих и пластических деформаций, а также снижения значения  $a_s$  в результате растворяющей способности фильтрующихся углеводородов.



### Обсуждение

Таким образом, длительная устойчивость пласта к разрушению будет определяться как напряжениями, действующими в породе вблизи забоя скважины в условиях притока флюидов, так и прочностными и реологическими свойствами самой породы, зависящими от состава пластовой нефти, песка и технологических условий проведения процесса закрепления. При эксплуатации скважин, склонных к пробкообразованию, необходимо ограничивать депрессию пластового давления предельно допустимой величиной, когда материал прифильтровой зоны находится в упругом состоянии по всему объему.

При определении напряженного состояния упругого полого шара при фильтрации через его стенку жидкости необходимо решить задачу о напряжениях для случая фильтрации жидкости к центру шара при снижении давления в его полости ( $\chi = -1$ ). Этот случай представляет для нас элемент общей задачи о напряженном состоянии кольцевого фильтра за обсадной колонной при работе скважины. Задача решается в следующей последовательности.

Сначала решается задача фильтрации жидкости – определяются изменения давления в исследуемом теле при фильтрации жидкости. Затем решается уравнение равновесия относительно радиальной деформации (4) [18], по (24)

$$(\lambda + 2\mu) \frac{d}{dr} \left( \frac{du}{dr} + 2 \frac{u}{r} \right) = \chi(1 - \alpha\beta) \frac{dP}{dr}, \quad (24)$$

после чего, подставляя значения этой функции и ее производных в уравнение (2) [18] и используя граничные условия  $r = a, \sigma_r = 0, P = P_a; r = b, \sigma_r = \sigma_{rs}, P = P_b$ , находим постоянные интегрирования уравнения (24), входящие в основные зависимости, чем, по существу, и заканчивается решение поставленной задачи.

Найдем закон распределения давления в стенке полого шара при фильтрации жидкости, вызванной давлением в его полости ( $\chi = -1$ ) и решая уравнение нестационарного притока жидкости через стенку половины поверхности полого шара (25):

$$2\pi r^2 \cdot \frac{K_1}{\mu_{ж}} \cdot \frac{dP}{dr} = \text{const}, \quad (25)$$

при граничных условиях  $r = a, P = P_a; r = b, P = P_b$  получим закон распределения давления жидкости при фильтрации (26), (27):

$$P = P_b + \frac{a}{b-a} \cdot \left( \frac{b}{r} - 1 \right) \cdot (P_a - P_b) = P_a + \frac{b}{b-a} \cdot \left( \frac{a}{r} - 1 \right) \cdot (P_a - P_b), \quad (26)$$

$$q = \frac{Q_{ж}}{n} = \frac{2\pi a b K_1}{\mu_{ж}(b-a)} \cdot (P_a - P_b). \quad (27)$$

Подставляя значение перепада давления в пласте  $P_b$ , приходящегося на толщину депрессионной воронки (за вычетом толщины фильтра за колонной), из формулы Дюпюи имеем по (28)

$$P_b = \frac{Q_{ж} \mu_{ж}}{2\pi h K_2} \cdot \ln \frac{R_K}{r_c + b} \quad (28)$$

получим окончательно по (29):

$$P_b = \frac{Q_{ж} \mu_{ж}}{2\pi h K_1} \cdot \left( \frac{b}{r} - 1 + \frac{n b K_1}{h K_2} \cdot \ln \frac{R_K}{r_c + b} \right). \quad (29)$$

Из формулы (28) при  $r = a$  находим величину полного перепада давления  $\Delta P$  на пласт и фильтр (30):

$$\Delta P = P_a = \frac{Q_{ж} \mu_{ж}}{2\pi h b K_1} \cdot \left( \frac{b}{a} - 1 + \frac{n b K_1}{h K_2} \cdot \ln \frac{R_K}{r_c + b} \right). \quad (30)$$

С учетом (30) формулу (6) можно представить в виде (31):

$$P = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a}{r} \right) \cdot A \right] \cdot P_a. \quad (31)$$

Функция среднего давления жидкости в стенке полого шара в пределах радиуса может быть представлена (32)

$$\varphi = \frac{1}{r^3} \cdot \int_0^r r^2 P dr. \quad (32)$$

Подставляя давление  $P$  из (26), получим (33):

$$\varphi = \frac{1}{3} P_b + \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{b-a} \cdot \left( \frac{a}{r} - \frac{2}{3} \cdot \frac{a}{b} \right) \cdot (P_a - P_b). \quad (33)$$

При оценке состояния прифильтровой зоны пласта используется параметр «скин-эффект», представляющий собой относительную величину снижения коэффициента продуктивности скважины при загрязнении прифильтровой зоны [19] (34):

$$S = \left( \frac{\eta_2}{\eta} - 1 \right) \cdot \ln \frac{R_K}{r_c + b}, \quad (34)$$

где  $\eta_2$  – коэффициент продуктивности скважины перед коксованием;  $\eta$  – коэффициент продуктивности скважины после коксования.

Подставляя значения  $\eta_2 = \frac{Q_{ж}}{P_b}$  из уравнения (5) и  $\eta = \frac{Q_{ж}}{P_a}$  из уравнения (30), получим формулу для определения «скин-эффекта», обусловленного наличием фильтра за колонной труб (35):

$$S = \frac{h K_2}{h b K_1} \cdot \frac{b-a}{a}. \quad (35)$$

При  $\frac{b}{a} \gg 1$  выражение (35) упрощается до вида (36)

$$S = \frac{h K_2}{n a K_1}. \quad (36)$$

Решим теперь задачу о напряжениях в стенке полого шара. Интеграл уравнения равновесия упругого тела (24) имеет вид (37):

$$E' \cdot u = \frac{1}{3} \cdot cr + \frac{D}{r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r r^2 P dr, \quad (37)$$

где (38)

$$E' = \frac{\lambda + 2\mu}{\chi(1 - \alpha\beta)}. \quad (38)$$

Из уравнения (37) найдем значения  $\frac{du}{dr}, \frac{u}{r}, \Delta$  (39)

$$E' \frac{du}{dr} = \frac{c}{3} - 2 \frac{D}{r^3} - 2\varphi + P, \\ E' \frac{u}{r} = \frac{c}{3} + \frac{D}{r^3} + \varphi, \\ E' \Delta = c + P. \quad (39)$$

Подставляя найденное значение деформаций в уравнение (39), получим выражение компонент главных нормальных напряжений в стенке полого шара (40):

$$E' \sigma_r = \frac{\beta c}{3} + (\lambda + 2\mu + \omega E') \cdot P - 4\mu \frac{D}{r^3}, \quad (40)$$

$$E' \sigma_\theta = \frac{\beta c}{3} + (\lambda + \omega E') \cdot P + 2\mu\varphi + 2\mu \frac{D}{r^3}.$$

Или по (41)

$$E' \sigma_\theta = E' \sigma_r - 2\mu(P - 3\varphi) + 6\mu \frac{D}{r^3}, \omega = \chi\alpha\beta. \quad (41)$$

Используя граничные условия  $r = a, P = P_a, \sigma_r = 0$ ;  $r = b, P = P_b, \sigma_r = \sigma_{rb}$ , найдем входящие в (37) постоянные интегрирования С и D (42):

$$4\mu D = \frac{a^3 b^3}{b^3 - a^3} \cdot [E' \sigma_{rb} + (\lambda + \omega E') \cdot (P_a - P_b)],$$

$$\frac{\beta C}{3} = 4\mu \frac{D}{a^3} - \frac{\beta P_a}{3} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu b}{b-a} \cdot (P_a - P_b). \quad (42)$$

Подставляя найденные выражения постоянных в формулы (37) и (39), получим окончательно (43):

$$\sigma_r = \frac{b^3}{b^3 - a^3} \left(1 - \frac{a^3}{r^3}\right) \sigma_{rb} + \frac{\lambda + \omega E'}{E'} \times$$

$$\times \left[ \frac{b^3}{b^3 - a^3} \cdot \left(1 - \frac{a^3}{r^3}\right) - \frac{b}{b-a} \left(1 - \frac{a}{r}\right) \right] \cdot (P_a - P_b),$$

$$\sigma_\theta = \frac{b^3}{b^3 - a^3} \left(1 + \frac{a^3}{2r^3}\right) \sigma_{rb} +$$

$$+ \left\{ \frac{\lambda + \omega E'}{E'} \frac{b^3}{b^3 - a^3} \cdot \left(1 - \frac{a^3}{2r^3}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{b}{b-a} \left[ \omega + \frac{\lambda}{E'} - \left( \frac{\lambda + \mu}{E'} + \varpi \right) \frac{a}{r} \right] \right\} \cdot (P_a - P_b)$$

$$u = \frac{\sigma_{rb}}{4\mu} \cdot \frac{b^3}{b^3 - a^3} \left( \frac{4\mu}{\beta} + \frac{a^3}{r^3} \right) \cdot r + \frac{\omega E'}{\beta} P_a r +$$

$$+ \left[ \frac{\lambda + \omega E'}{4\mu E'} \cdot \frac{b^3}{b^3 - a^3} \left( \frac{4\mu}{\beta} + \frac{a^3}{r^3} \right) \cdot r + \right.$$

$$\left. + \frac{ab}{2(b-a)E'} \left(1 - 2\frac{\lambda}{\beta} \cdot \frac{a}{r}\right) \right] \cdot (P_a - P_b); \quad (43)$$

$$\frac{\lambda + \omega E'}{E'} = \frac{\chi[v + (1-2v)\alpha\beta]}{1-v}, \quad \frac{\lambda + \mu}{E'} = \chi \frac{1-\alpha\beta}{2(1-v)},$$

$$\frac{\omega E'}{\beta} = \frac{\alpha\beta}{1-\alpha\beta} \cdot \frac{1-v}{1+v},$$

$$\frac{\lambda + \omega E'}{4\mu E'} = \chi \frac{1+v}{2 \cdot (1-v)E} \cdot [v + (1-2v)\alpha\beta],$$

$$\frac{4\mu}{\beta} = 2 \frac{1-2v}{1+v}, \quad \frac{\lambda}{\beta} = \frac{v}{1+v}.$$

Анализируя зависимости (43), можно заметить, что знак приращения главных нормальных напряжений, вызванных действием фильтрационного давления в пористой среде, зависит от знака изменения статического давления жидкости, насыщающей пористую среду. Причем по абсолютной величине напряжения, вызванные снижением статического давления жидкости, равны напряжениям, вызванным увеличением давления жидкости на ту же величину, то есть (рис. 1):

$$\sigma_r |_{\chi=+1} = -\sigma_r |_{\chi=-1}, \quad \sigma_\theta |_{\chi=+1} = -\sigma_\theta |_{\chi=-1}.$$

На рис. 2 приведены зависимости изменения главных нормальных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  по толщине стенки полого шара, свободного от внешней нагрузки ( $\sigma_{rb} = 0$ ), при создании избыточного давления в полости шара ( $\chi = +1$ ) и при депрессии ( $\chi = -1$ ,  $\Delta P = -P_a, P_b = 0$ ). Кривые  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  постоянные для  $\alpha\beta = 0, \alpha\beta = 0,5$  и  $\alpha\beta = 1$ . Заметим, что впервые за-

дача о напряжениях в упругой пористой среде при фильтрации жидкости через стенку цилиндрического отверстия (скважины) в нефтяном пласте была решена Ю.П. Желтовым и С.А. Христиановичем, разработавшими теорию гидравлического разрыва пласта при значении параметра  $\alpha\beta = 0$  в правой части уравнения (24). Вскоре та же задача теории упругости была решена в работе [20] (при  $\alpha\beta = 1$ ), где учтено влияние эффекта сжимаемости породообразующих минералов на напряженное состояние пористой среды при фильтрации жидкости.

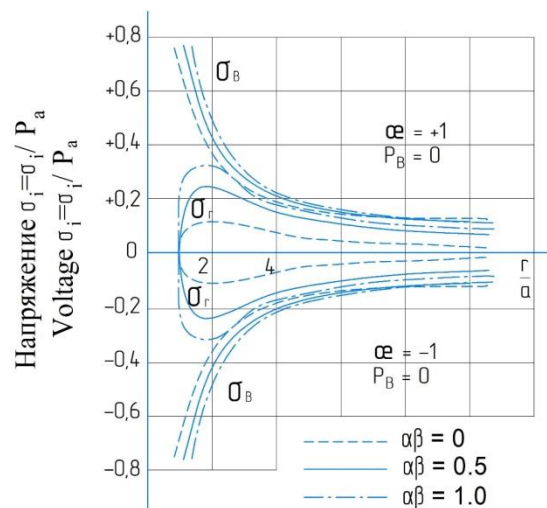


Рис. 1. Изменение главных нормальных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  по толщине стенки полого шара, свободного от внешней нагрузки ( $\sigma_{rb} = 0$ )

Fig. 1. Change in the principal normal stresses  $\sigma_r$  and  $\sigma_\theta$  along the wall thickness of a hollow sphere free from external load ( $\sigma_{rb} = 0$ )

Данные табл. 1 в [21], показывают, что приведенные в работах [22, 23] решения задачи (при  $\alpha\beta = 0$  и  $\alpha\beta = 1, \chi = +1$ ) являются предельными решениями, так как истинное значение параметра  $\alpha\beta$  находится для реальных горных пород при умеренных нагрузках в пределах 0,3–0,6.

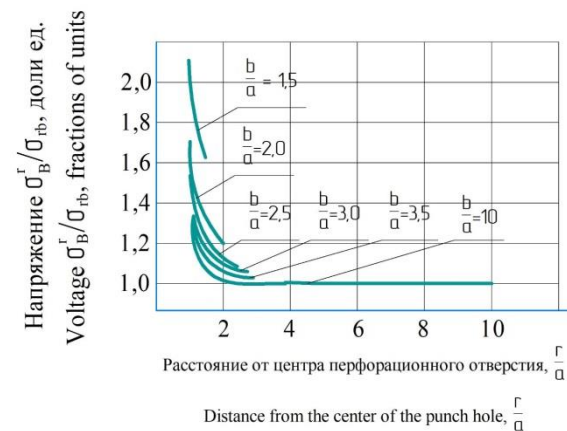


Рис. 2. Распределение тангенциальных напряжений  $\sigma_\theta^r$  в закрепленной зоне в зависимости от ее радиуса

Fig. 2. Distribution of tangential stresses  $\sigma_\theta^r$  in the fixed zone depending on its radius

Анализ полученных зависимостей (43) показывает, что изменение знака потенциала фильтрации ( $\Delta P = \pm P_a$ ) приводит к изменению напряжения  $\sigma_\theta$  в пределах от  $-1,5 P_a$  до  $+1,5 P_a$ , то есть  $\Delta\sigma_\theta = 3 \cdot P_a$ . Именно этим можно объяснить отрицательное действие остановок скважины, а тем более изменение направления фильтрационного потока в прифильтровой зоне пласта, на устойчивость стенок скважины, эксплуатация которых осложнена пескопроявлениями.

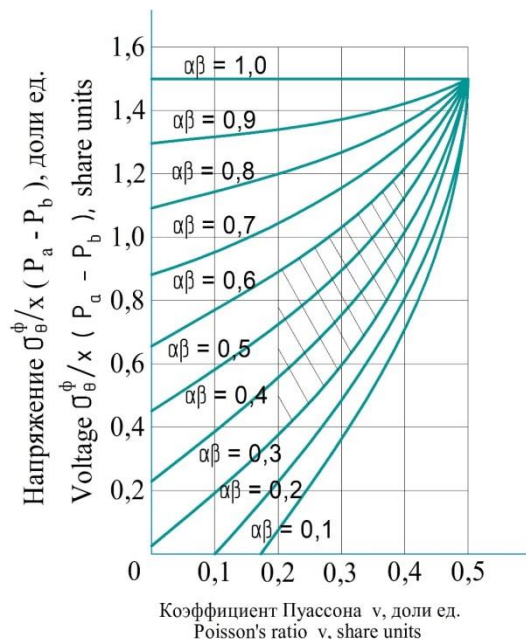


Рис. 3. Изменение фильтрационных тангенциальных напряжений на стенке скважины (при  $r = a$ ) в зависимости от коэффициента Пуассона при  $\frac{b}{a} = 10$

Fig. 3. Change in filtration tangential stresses on the borehole wall (at  $r = a$ ) depending on Poisson's ratio at  $\frac{b}{a} = 10$

При быстром приложении нагрузки на пласт (при пуске скважины в эксплуатацию) напряженное состояние прифильтровой зоны будет зависеть от параметра  $\alpha\beta$ , его величины. В дальнейшем, по мере развития пластических деформаций в условиях сохранения

объема, эффект сжимаемости будет играть подчиненное значение и стремиться к нулю ( $\alpha\beta \rightarrow 0$ ). При этом коэффициент Пуассона  $\nu$  будет стремиться к 0,5, а модуль Юнга изменяться во времени и определять связь между напряжениями и скоростью деформации [24, 25].

Обратим внимание на весьма любопытный факт. Согласно зависимости (43), при прочих равных условиях, напряжения в пористой среде с параметрами  $\alpha\beta = 1$  и  $\nu$  произвольном равны напряжениям в пористой среде с параметрами  $\alpha\beta = 0$  и  $\nu = 0,5$ . Отсюда следует важный вывод, что напряженное состояние упругой пористой среды при мгновенном приложении нагрузки сохраняется при переходе среды из упругого состояния в пластическое течение с сохранением объема, когда коэффициент Пуассона равен 0,5. Характер модуля Юнга можно оценить путем прямых измерений деформации стенок полого шара или скважины (рис. 3).

### Заключение

Изменение знака потенциала фильтрации приводит к изменению тангенциальных напряжений на стенке скважины до величины, равной утроенной депрессии пластового давления (при этом радиальные напряжения равны нулю). Этим объясняется отрицательное действие остановок скважин, а тем более изменение направления фильтрационного потока в прискважинной части пласта на устойчивость стенок скважин, эксплуатация которых осложнена пескопроявлением пласта.

При эксплуатации скважин, склонных к пробкообразованию, необходимо ограничивать депрессию пластового давления предельно допустимой величиной, когда материал прифильтровой зоны находится в упругом состоянии по всему объему.

Таким образом, максимальная разность главных нормальных напряжений наблюдается на стенке скважины, поэтому для предотвращения разрушения пласта вблизи забоя необходимым условием является соответствие прочностных свойств горных пород напряжениям, действующим в этой зоне.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние физико-механических свойств пласта и падения пластового давления на пескопроявление / В.Ю. Близинок, А.Г. Гилаев, З.Х. Моллаев, Р.Ф. Исламов, Р.Т. Еганьянц // Инженер-нефтяник. – 2010. – № 3. – С. 5–9.
2. Xue L., Widera G., Sang Z. Parametric FEA study of burst pressure of cylindrical shell intersections // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2010. – V. 132. – № 3. – P. 31203.
3. Andreev V.I., Avershyev A.S. Two-dimensional problem of moisture elasticity of inhomogeneous spherical array with cavity // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 580–583. – P. 812–815.
4. Gao S., Wang X., Wang L. Effect of temperature and moisture state changes on modulus of elasticity of red pine small clear wood // Wood and Fiber Science. – 2013. – V. 45 (2). – P. 442–450.

5. Игошин Д.Е., Никонова О.А., Мостовой П.Я. Моделирование пористой среды регулярными упаковками пересекающихся сфер // Вестник Тюменского государственного университета. – 2014. – № 7. – С. 34–42.
6. Исаева А.В., Доброжанский В.А. Математическое моделирование неизоотермического фильтрационного течения в нефтяных пластах // Ломоносовские чтения. Секция физики. Сборник тезисов докладов. – М.: Физический факультет МГУ, 2017. – С. 240–242.
7. Kim Y.J., Lee K.H., Park C.Y. Limit loads for thin-walled piping branch junctions under combined pressure and in-plane bending // Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2008. – V. 43. – № 2. – P. 87–108.
8. Ватулян А.О., Нестеров С.А. Об одном способе идентификации термоупругих характеристик для неоднородных тел // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87. – № 1. – С. 217–224.

9. Гилаев Ген.Г., Хабидуллин М.Я., Гилаев Г.Г. Перспективы применения кислотного геля для закачки проппанта в процессе проведения гидроразрыва карбонатных пластов на территории самарской области // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 8. – С. 54–57. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57
10. Использование принципов системного геолого-технологического прогнозирования при обосновании методов воздействия на пласт / В.В. Мухаметшин, В.Е. Андреев, Г.С. Дубинский, Ш.Х. Султанов, Р.Т. Ахметов // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – С. 46–51. DOI: 10.5510/OGP20160300288.
11. Коннов Ю.Д., Сидоркин Д.И., Хабидуллин М.Я. Механизация технологического процесса спускоподъемных операций при текущем и капитальном ремонте скважин // SOCAR Proceedings. – 2018. – № 2. – С. 15–24. DOI: 10.5510/OGP20180200346
12. Khabibullin M.Ya. Managing the processes accompanying fluid motion inside oil field converging-diverging pipes // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012
13. Terentiev A.G. Deep water technology: problems and solutions // World Maritime Technology Conf. – Saint-Petersburg, 2012. – P. 1–7.
14. Mackerle J. Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping, an addendum: a bibliography (2001–2004) // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2005. – V. 82. – № 7. – P. 571–592.
15. Шагапов В.Ш., Нагаева З.М. Об упругом режиме фильтрации в гидроразрывной трещине // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. – 2016. – Т. 11. – № 2. – С. 156–166.
16. Нефтяные залежи в карбонатных отложениях фаменского яруса самарской области: история открытия и перспективы поиска / Г.Г. Гилаев, А.Э. Манасян, Г.Д. Федорченко, В.А. Колесников, И.А. Кологреев // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 10. – С. 38–40.
17. Khabibullin M.Ya. Managing the reliability of the tubing string in impulse non-stationary flooding // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». 4. Mechatronics, Robotics and Electrical Drives. – 2019. – P. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012
18. Terentiev A.G., Kirschner I.N., Uhlman J.S. The hydrodynamics of gravitating flows. – USA: Backbone Publishing Company, 2011. – 598 p.
19. Fukuchi N., Okada K., Sugita N. An elastic-plastic analysis of large deflection of thin shell structure using a delta-sequence function // Thin-Walled Structures. – 2006. – V. 44. – № 1. – P. 91–101.
20. Расчет деформаций и экспериментальное исследование текстуры в нагартованной медной проволоке / Ю.Н. Логинов, С.Л. Демаков, А.Г. Илларионов, М.С. Карабаналов // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 5. – С. 38–44.
21. Рогов Е.А. Исследование проницаемости призабойной зоны скважин при воздействии технологическими жидкостями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 169–173. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.169
22. Pressure transient and rate decline analysis for hydraulic fractured vertical wells with finite conductivity in shale gas reservoirs / C. Guo, J. Xu, M. Wei, O. Han, L. Wan // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2015. – V. 5. – № 4. – P. 435–443. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-014-0149-3> (дата обращения: 15.09.2021).
23. Хабидуллин М.Я. Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 128–134.
24. Шагапов В.Ш., Нагаева З.М. К теории фильтрационных волн давления в трещине, находящейся в пористой проницаемой среде // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58. – № 5 (345). – С. 121–130.
25. Fang J., Tang Q., Sang Z. A comparative study of usefulness for pad reinforcement in cylindrical vessels under external load on nozzle // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2009. – V. 86. – P. 273–279.

Поступила 22.09.2021 г.

#### Информация об авторах

**Хабидуллин М.Я.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 622.322

## RESEARCH OF A RESERVOIR BOTTOM ZONE DESTRUCTION BY FILTERING FLOW OF THE FORMATION LIQUID AND PREVENTION OF CALL FORMATION IN THE WELL

**Marat Ya. Khabibullin,**  
m-hab@mail.ru

Ufa State Petroleum Technological University, branch in Oktyabrsky,  
54-a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to prevent the formation destruction near the bottom of the wells and the appearance of a large amount of sand in the formation fluid during its filtration into the bottomhole zone of the well. The solution to this problem will improve the work of filtration of formation fluid from the layer into the well and reduce the cost of additional application of methods for stimulating the inflow of formation fluid to the well.

**The aim** of the research is to develop and propose a methodology that allows, during the operation of wells prone to plugging, limiting the reservoir pressure depression to the maximum permissible value at which the material of the filter zone is in elastic state throughout the entire volume.

**Objects.** To determine the stress state in this section of the string, it is necessary to represent this element in the form of a hollow ball, which rests on the casing string. When the hydraulic pressure in the material of the porous medium for the formation fluid filtration decreases, it will expand in the absence of obstacles to the flow of this process. At the same time, there is an increase in the formation fluid pressure outside the hollow sphere. Therefore, it is necessary to find the regularities that occur during the expansion–contraction of a porous medium in formation fluid filtration through a hollow sphere.

**Methods.** The largest difference in normal stresses occurs on the borehole wall, since the radial stresses are equal to the minimum, and the tangential stresses are equal to the maximum values. Therefore, depending on the reservoir pressure depression and the strength properties of the fixed zone, the following well operating conditions are possible: the fixed near-wellbore part of the formation throughout the entire volume is in an elastic state; the fixed near-wellbore part of the formation throughout the volume is in a plastic state. It is known from the solution of the elastic problem that the largest difference in the normal stresses in the body of a hollow ball during fluid filtration through its wall to the center occurs on the inner surface. Therefore, the conditions for the fluidity of the ball material will arise, first of all, on the inner surface of the ball. Solving the elastic problem, taking into account the compressibility of the rock, it is possible to determine the magnitude of the pressure drop on the formation, which excludes the possibility of plastic flow of the formation material, that is, the permissible pressure drop.

**Results.** When operating wells prone to plugging, it is necessary to limit the reservoir pressure drawdown to the maximum permissible value, when the material of the near-filter zone is in an elastic state throughout the volume. Thus, the maximum difference in the main normal stresses is observed on the borehole wall, therefore, in order to prevent the destruction of the formation near the bottom hole, the necessary condition is the compliance of the strength properties of rocks with the stresses acting in this zone.

### Key words:

Deformation, intensity, radius, thickness, well, reservoir.

### REFERENCE

- Bliznyukov V.Yu, Gilaev A.G., Mollaev Z.Kh., Islamov R.F., Eganyants R.T. Influence of physical and mechanical properties of the reservoir and the drop of reservoir pressure on sand production. *Petroleum Engineer*, 2010, vol. 3, pp. 5–9.
- Xue L., Widera G., Sang Z. Parametric FEA study of burst pressure of cylindrical shell intersections. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2010, vol. 132, no. 3, pp. 31203.
- Andreev V.I., Avershyev A.S. Two-dimensional Problem of Moisture Elasticity of Inhomogeneous Spherical Array with Cavity. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 580–583, pp. 812–815.
- Gao S., Wang X., Wang L. Effect of temperature and moisture state changes on modulus of elasticity of red pine small clear wood. *Wood and Fiber Science*, 2013, vol. 45 (2), pp. 442–450.
- Igoshin D.E., Nikonova O.A., Mostovoy P.Ya. Modeling a porous medium by regular packings of intersecting spheres. *Bulletin of the Tyumen State University*, 2014, no. 7, pp. 34–42. In Rus.
- Fang J., Tang Q. H., Sang Z. F. A comparative study of usefulness for pad reinforcement in cylindrical vessels under external load on nozzle. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009, vol. 86, pp. 273–279.
- Kim Y.J., Lee K.H., Park C.Y. Limit loads for thin-walled piping branch junctions under combined pressure and in-plane bending. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2008, vol. 43, no. 2, pp. 87–108.
- Vatulyan, A.O. Nesterov S.A. On one method of identification of thermoelastic characteristics for inhomogeneous bodies. *Inzhenernofizicheskiy zhurnal*, 2014, vol. 87, no. 1, pp. 217–224. In Rus.
- Gilaev Gen. G., Khabibullin M.Ya., Gilaev G.G. Prospects for using acid gel for pumping proppant in the process of hydraulic fracturing of carbonate reservoirs in the Samara region. *Oil industry*, 2020, no. 8, pp. 54–57. DOI: 10.24887 / 0028-2448-2020-8-54-57. In Rus.
- Mukhametshin V.V., Andreev V.E., Dubinsky G.S., Sultanov Sh.Kh., Akhmetov R.T. Using the principles of system geological and technological forecasting in the substantiation of methods of impact on the reservoir. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 46–51. DOI: 10.5510 / OGP20160300288. In Rus.
- Konnov Yu.D., Sidorkin DI, Khabibullin M.Ya. Mechanization of the technological process of tripping operations during routine and overhaul of wells. *SOCAR Proceedings*, 2018, no. 2, pp. 15–24. DOI: 10.5510 / OGP20180200346. In Rus.
- Khabibullin M.Ya. Managing the processes accompanying fluid motion inside oil field converging-diverging pipes. *Journal of Physics. Conference Series. International Conference. Information Technologies in Business and Industry*, 2019, pp. 042012. DOI: 10.1088 / 1742-6596 / 1333/4/042012.
- Terentiev A.G. Deep water technology: problems and solutions. *World Maritime Technology Conf. Saint-Petersburg*, 2012. pp. 1–7.
- Mackerle J. Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping, an addendum: a bibliography (2001–2004). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005, vol. 82, no. 7, pp. 571–592.
- Shagapov V.Sh., Nagaeva Z.M. On the elastic filtration regime in a hydraulic fracture, *Proceedings of the Institute of Mechanics*.

- R.R. Mavlyutov of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 156–166. In Rus.
16. Gilaev G.G., Manasyan A.E., Fedorchenko G.D., Kolesnikov V.A., Kologreev I.A. Oil deposits in carbonate sediments of the Famennian stage of the Samara region: the history of discovery and prospect of search. *Oil Industry*, 2013, no. 10, pp. 38–40. In Rus.
  17. Khabibullin M.Ya. Managing the reliability of the tubing string in impulse non-stationary flooding. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference. Information Technologies in Business and Industry. 4. Mechatronics, Robotics and Electrical Drives*, 2019, pp. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012.
  18. Terentiev A.G., Kirschner I.N., Uhlman J.S. *The hydrodynamics of gravitating flows*. USA, Backbone Publishing Company, 2011. 598 p.
  19. Fukuchi N., Okada K., Sugita N. An elastic-plastic analysis of large deflection of thin shell structure using a delta-sequence function. *Thin-Walled Structures*, 2006, vol. 44, no. 1, pp. 91–101.
  20. Loginov Yu.N., Demakov S.L., Illarionov A.G., Karabanalov M.S. Calculation of deformations and experimental study of texture in cold-worked copper wire. *Deformation and destruction of materials*, 2011, no. 5, pp. 38–44. In Rus.
  21. Rogov E.A. Study of the permeability of the bottomhole zone of wells when exposed to technological fluids. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 242, pp. 169–173. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.169.
  22. Guo C., Xu J., Wei M., Han O., Wan L. Pressure transient and rate decline analysis for hydraulic fractured vertical wells with finite conductivity in shale gas reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 435–443. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13202-014-0149-3> (accessed 15 September 2021).
  23. Khabibullin M.Ya. Improvement of the process of hydrochloric acid treatment of wells using the latest technologies and equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 128–134. In Rus.
  24. Shagapov V.Sh., Nagaeva Z.M. On the theory of filtration pressure waves in a crack in a porous permeable medium. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, no. 5 (345), pp. 121–130. In Rus.
  25. Fang J., Tang Q., Sang Z. A comparative study of usefulness for pad reinforcement in cylindrical vessels under external load on nozzle. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009, vol. 86, pp. 273–279.

Received: 22 September 2021.

#### Information about the authors

**Marat Ya. Khabibullin**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University, branch in Oktyabrsky.

УДК 665.612.2

## УТИЛИЗАЦИЯ РАЗНОРОДНЫХ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ В УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАЛОЭМИССИОННОЙ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКЕ С ВНЕШНИМ ПОДОГРЕВОМ ТОПЛИВНОГО ГАЗА

Шилова Алена Алексеевна<sup>1</sup>,  
alyona1203@gmail.com

Бачев Николай Леонидович<sup>1</sup>,  
bnl54@yandex.ru

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью создания отечественных газотурбинных энергоустановок с универсальной малоэмиссионной камерой сгорания для утилизации нефтяных газов с различным содержанием балластирующих компонентов. В последнее время предложены и исследуются различные способы снижения эмиссии вредных веществ в газотурбинных двигателях (гомогенное горение, впрыск воды или пара, диффузионное горение по схеме «богатое горение – резкое разбавление – бедное горение» (RQQL) и т. д.). В данной работе предлагается и исследуется вариант низкотемпературного и малоэмиссионного горения с внешним подогревом нефтяного газа перед его подачей в утилизационную камеру сгорания.

**Цель:** разработать термодинамические модели определения режимных параметров утилизационной энергоустановки с подогревателем топливного газа в ее составе и выявить влияние степени забалластированности нефтяного газа на коэффициенты избытка воздуха и расходные характеристики в камере сгорания для мощностного ряда энергоустановок.

**Объекты:** утилизационная газотурбинная энергоустановка, подогреватель топливного газа, малоэмиссионная камера сгорания.

**Методы:** термодинамическое моделирование утилизационной газотурбинной установки с подогревом нефтяного газа перед его подачей в камеру сгорания и термодинамический расчет параметров низкотемпературного малоэмиссионного горения обедненной газо-воздушной смеси.

**Результаты.** Получены режимные параметры утилизационной газотурбинной установки и подогревателя топливного газа в ее составе. Для нефтяных газов с различным содержанием балластирующих компонентов определены минимальные температуры подогрева, при которых возможно устойчивое горение. Определены потребные значения коэффициента избытка воздуха и расходные характеристики для семейства энергоустановок. Даны рекомендации по выбору диаметра камеры сгорания для мощностного ряда утилизационных энергоустановок.

### Ключевые слова:

Забалластированный топливный газ, низкотемпературное малоэмиссионное горение, внешний подогрев топливного газа, устойчивое горение, мощностной ряд установок.

### Введение

При разработке новых отечественных микрогазотурбинных утилизационных установок или при их получении конвертацией вспомогательных установок разного назначения центральное место занимает создание малоэмиссионной камеры сгорания (КС) с устойчивым горением топливного газа [1, 2]. Разработка малоэмиссионной КС значительно усложняется, если разрабатывается универсальная КС для утилизации нефтяных газов (НГ) с различным содержанием балластирующих компонентов и теплопроизводительностью [3, 4].

К настоящему моменту времени предложены и разрабатываются различные конструктивные компоновки низкоэмиссионных КС в составе газотурбинных установок (ГТУ). Привычные и известные действия для снижения эмиссии вредных веществ в КС традиционных схем являются компромиссом между выбросами несгоревших углеводородов иугарного газа, с одной стороны, и выбросами оксидов азота, с другой стороны [5–11]: сжиганиепредварительно перемешанной обедненной топливной смеси в «сухих» КС; применение «мокрых» КС с диффузионным факелом и впрыском пара (воды); каталитическое сжигание (полное окисление) топливно-воздушной смеси;

дополнительное использование каталитической очистки выхлопных газов ГТУ.

В работах [12–18] теоретически обоснован экспериментально подтвержден новый способ расширения концентрационных пределов горения газов при интенсификации предпламенных процессов с помощью внешнего подогрева компонентов. В исследованиях показано, что низкотемпературное сжигание бедных горюче-воздушных смесей (ГВС) при высоких значениях коэффициента избытка окислителя – один из перспективных методов снижения эмиссии вредных веществ в стационарных ГТУ.

В данной работе рассматриваются вопросы организации низкотемпературного малоэмиссионного бедного горения при предварительном внешнем подогреве топливного газа.

Работы [19–22] посвящены экспериментальным исследованиям влияния начальной температуры топливного газа на верхние и нижние пределы горения. Результаты экспериментальных и теоретических исследований о влиянии начальной температуры горючего на нижний предел горения представлены в работе [23]. В работах [24–27] указывается, что предварительный подогрев топливного газа перед его подачей в КС расширяет пределы горения и можно организо-

вать низкотемпературное горение на бедном пределе. Реализация такого типа горения позволила бы разрабатывать неохлаждаемые однозонные КС в составе утилизационных установок.

Для внешнего подогрева топливного газа предлагается использовать теплообменник в составе ГТУ, в котором топливный газ (вторичный теплоноситель) нагревается отработанными на турбине газами (первичный теплоноситель). Тогда область устойчивого горения определяется не только составом утилизируемого газа, но и режимными параметрами подогревателя топливного газа в составе установки.

С одной стороны, область горения ограничивается значениями коэффициента избытка окислителя на нижнем пределе ( $\alpha_{н}$ ), полученными методом флегматизации и зависящими от состава топливного газа [28, 29]. С другой стороны, область горения ограничивается значениями коэффициента избытка окислителя по параметрам установки ( $\alpha_{ГТУ}$ ), полученными из решения уравнения энергетического баланса с учетом температуры топливного газа на входе в камеру сгорания. Значения этой температуры, в свою очередь, определяется режимными и геометрическими параметрами теплообменника-подогревателя. Использование универсальной КС для утилизации НГ при разных степенях забалластированности предполагает наличие универсального теплообменника, который обеспечивает неизменное значение температуры топливного газа на входе в камеру сгорания.

Одним из определяющих факторов, влияющих на облик и потенциальные возможности газотурбинной энергоустановки, является степень сжатия компрессора  $\epsilon$ . Поэтому проведен параметрический анализ мощностного ряда энергоустановок (разные значения полезной мощности) с использованием семейства тербокомпрессоров (различные значения  $\epsilon$ ) при разных составах утилизируемого газа. В результате этого анализа выработаны рекомендации по выбору диаметра КС из условия устойчивого положения фронта пламени.

#### Термодинамическая модель расчета режимных параметров газотурбинной установки с внешним подогревом топливного газа

На рис. 1 представлена принципиальная схема ГТУ с внешним подогревателем топливного газа с однозонной неохлаждаемой утилизационной КС.

Компрессор – 1 обеспечивает подачу окислителя (воздуха) в камеру сгорания – 4. Система подачи топливного газа – 5 состоит из ресивера и редуктора. Перед подачей в камеру сгорания – 4 топливный газ нагревается в теплообменном аппарате – 6 отработанными на турбине – 2 газами. Внешний подогрев топливного газа позволяет осуществить низкотемпературное, малоэмиссионное горение на нижнем пределе в однозонной неохлаждаемой КС.

Режимные параметры компрессора

- Удельная работа сжатия

$$H_k = c_p^{ок} \cdot T_{ок.вх}^k \cdot \left( \epsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_k}$$

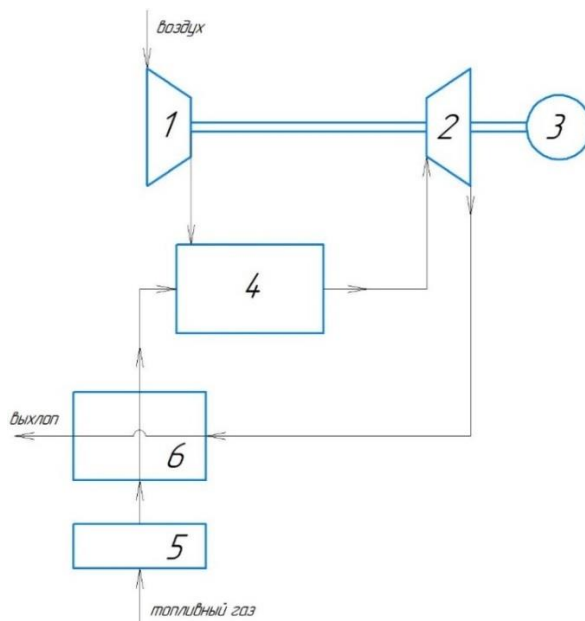


Рис. 1. Принципиальная схема газотурбинной установки с внешним подогревателем топливного газа с однозонной неохлаждаемой утилизационной камерой сгорания: 1 – компрессор; 2 – турбина; 3 – электрогенератор; 4 – камера сгорания; 5 – система подачи топливного газа; 6 – подогреватель топливного газа

Fig. 1. Schematic diagrams of a gas turbine plant with an external fuel gas heater and a single-zone uncooled recovery compressor station: 1 – compressor; 2 – turbine; 3 – electric generator; 4 – combustion chamber; 5 – fuel gas supply system; 6 – fuel gas heater

где  $c_{p,ок}$ ,  $k$  – удельная изобарная теплоемкость и показатель адиабаты окислителя (воздуха);  $T_{ок.вх}^k$  – температура окислителя (воздуха) на входе в компрессор;  $\epsilon$ ,  $\eta_k$  – степень сжатия и КПД компрессора.

- Давление на выходе

$$P_{ок.вых}^k = P_{ок.вх}^k \cdot \epsilon,$$

где  $P_{ок.вх}^k$  – давление на входе в компрессор.

- Температура на выходе

$$T_{ок.вых}^k = T_{ок.вх}^k + \frac{H_k}{c_{p,ок}^k}.$$

Режимные параметры турбины

- Степень расширения на турбине

$$\delta = \lambda \cdot \epsilon,$$

где коэффициент потерь по газовой трубе  $\lambda = 0,93 \dots 0,96$ .

- Удельная работа расширения

$$L_T = c_{p,газ} \cdot T_{газ.вх}^T \cdot \left( 1 - \frac{1}{\delta^{\frac{k-1}{k}}} \right) \cdot \eta_T,$$

где  $c_{p,газ}$ ,  $k$  – удельная изобарная теплоемкость и показатель адиабаты рабочего тела турбины;  $T_{газ.вх}^T$  – температура рабочего тела на входе в турбину;  $\eta_T$  – КПД турбины.

- Давление рабочего тела на выходе из турбины



$$P_{\text{газ.вых}}^T = \frac{P_{\text{газ.вх}}^T}{\delta},$$

где  $P_{\text{газ.вх}}^T$  – давление рабочего тела на входе в турбину.

- Температура рабочего тела на выходе из турбины

$$T_{\text{газ.вых}}^T = T_{\text{газ.вх}}^T - \frac{L_T}{c_p^{\text{газ}}}.$$

Система подачи топливного газа

Предполагается, что в систему подачи топливного газа будут входить редуктор и ресивер.

- Давление топливного газа на выходе из редуктора

$$P_{\text{гор.вых}}^{\text{ред}} = P_{\text{гор.вх}}^{\text{кк}} + \Delta P_{\text{гор}}^{\text{та}},$$

где  $\Delta P_{\text{гор}}^{\text{та}}$  – потери давления топливного газа в теплообменном аппарате;  $P_{\text{гор.вх}}^{\text{кк}}$  – давление топливного газа на входе в КС.

- Температура топливного газа на выходе из редуктора

$$T_{\text{гор.вых}}^{\text{ред}} = T_0 \cdot \left( \frac{P_{\text{гор.вых}}^{\text{ред}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

где  $P_0, T_0$  – давление и температура топливного газа в ресивере;  $k$  – показатель адиабаты топливного газа.

Режимные параметры камеры сгорания

- Температура топливного газа на входе в КС после внешнего подогрева

$$T_{\text{гор.вх}}^{\text{кк}} = T_{\text{гор.вых}}^{\text{ред}} + \mu \cdot (T_{\text{газ.вых}}^T - T_{\text{гор.вых}}^{\text{ред}}).$$

Коэффициент рекуперации  $\mu$  показывает степень использования тепла первичного теплоносителя и влияет на выходные характеристики, поверхность и габариты теплообменного аппарата.

- Температура окислителя (воздуха) на входе в КС без дополнительного подогрева

$$T_{\text{ок.вх}}^{\text{кк}} = T_{\text{ок.вых}}^{\text{кк}}.$$

- Коэффициент избытка окислителя (воздуха) в камере сгорания по параметрам установки определяется из энергетического баланса для КС и равен

$$\alpha_{\text{ГТУ}} = \frac{1}{K_{\text{м0}}} \cdot \frac{c_p^{\text{гор}} \cdot T_{\text{гор.вх}}^{\text{кк}} + Nu \cdot \eta_{\text{Г}} - c_p^{\text{газ}} \cdot T_{\text{газ.вх}}^T}{c_p^{\text{газ}} \cdot T_{\text{газ.вх}}^T - c_p^{\text{ок}} \cdot T_{\text{ок.вх}}^{\text{кк}}},$$

где  $c_{p,\text{гор}}, Nu$  – изобарная теплоемкость и теплопроизводительность топливного газа;  $\eta_{\text{Г}}$  – полнота сгорания топливного газа;  $K_{\text{м0}}$  – массовое стехиометрическое соотношение.

Расходные и энергетические характеристики

- Полезная работа установки

$$L_{\text{пол}} = L_T - H_{\text{к}}.$$

- Массовый расход рабочего тела через турбину

$$m_{\text{газ}}^{\text{вх}} = \frac{N_{\text{пол}}}{L_{\text{пол}}}.$$

- Массовый расход топливного газа

$$m_{\text{гор}}^{\text{вх}} = \frac{m_{\text{газ}}^{\text{вх}}}{1 + \alpha_{\text{ГТУ}} \cdot K_{\text{м0}}}.$$

- Массовый расход окислителя (воздуха)

$$m_{\text{ок}}^{\text{вх}} = m_{\text{газ}}^{\text{вх}} - m_{\text{гор}}^{\text{вх}}.$$

- Мощность, вырабатываемая турбиной

$$N_T = m_{\text{газ}}^{\text{вх}} \cdot L_T.$$

- Потребная мощность на привод компрессора

$$N_{\text{к}} = m_{\text{ок}}^{\text{вх}} \cdot H_{\text{к}}.$$

- Коэффициент полезной мощности

$$\varphi = \frac{N_{\text{пол}}}{N_T}.$$

- Коэффициент полезного действия энергоустановки

$$\eta_{\text{ГТУ}} = \frac{N_{\text{пол}}}{m_{\text{гор}}^{\text{вх}} \cdot Hu}.$$

Коэффициенты избытка окислителя (воздуха) на нижнем пределе горения подогретого топливного газа  $\alpha_{\text{н}}$  определялись по методике, описанной в [27].

#### Характеристики малоэмиссионного низкотемпературного горения с внешним подогревом нефтяного газа с различным содержанием балластирующих компонентов

В таблице представлены результаты термодинамических расчетов для реальных нефтяных газов (НГ) различных месторождений Российской Федерации [30] с различным содержанием балластирующих компонентов  $g_{\text{бал}}$ .

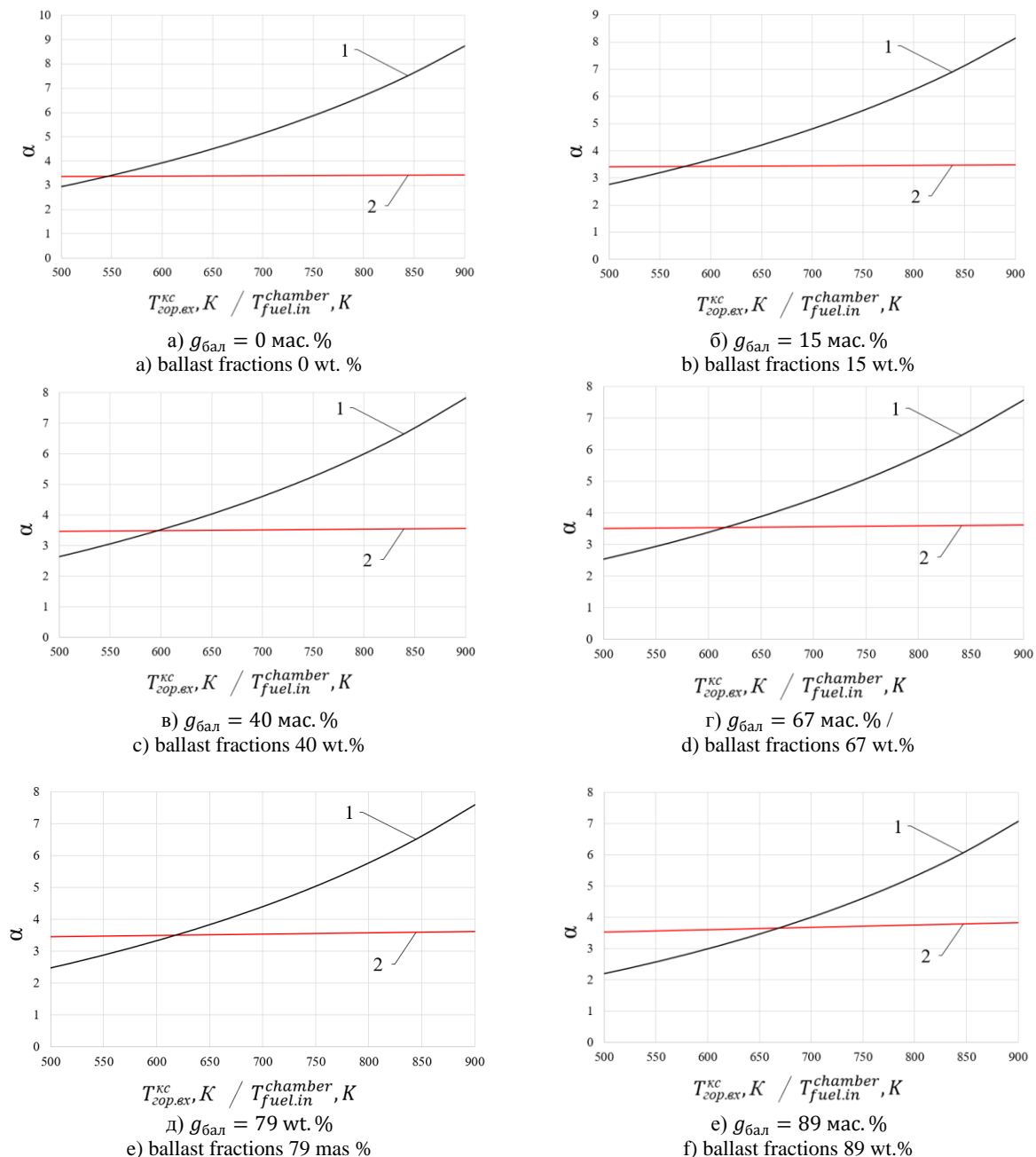
**Таблица.** Термодинамические характеристики забалластированных нефтяных газов

**Table.** Thermodynamic characteristics of ballasted petroleum gases

$g_{\text{бал}}$ , мас. % Ballast fractions, wt. %	$c_p^{\text{гор}}$ , Дж/кг·К $c_p^{\text{fuel}}$ , J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Коэффициент адиабаты $k$ , Adiabatic index, $k$	$Hu$ , МДж/кг $\Delta H$ , MJ·kg <sup>-1</sup>	Стехиометрическое соотношение $K_{\text{м0}}$ Air-fuel ratio AFR
0	2448	1,268	50,1	15,544
15	1970	1,150	40,7	12,383
40	1722	1,176	30,4	9,008
67	1448	1,212	19,2	5,554
79	1310	1,278	11,9	3,394
89	1190	1,322	6,6	1,792

Расчеты по определению областей устойчивого горения проводились для разных энергоустановок со степенями сжатия на компрессоре  $\varepsilon$  в диапазоне от 1,8 до 5,5. На рис. 2 в качестве примера показаны графические зависимости  $\alpha_{\text{н}} = f(T_{\text{гор.вх}}^{\text{кк}})$  и  $\alpha_{\text{ГТУ}} = f(T_{\text{гор.вх}}^{\text{кк}})$  для НГ с процентами забалластиванности от 0 до 89 мас. % для энергоустановки со степенью сжатия  $\varepsilon = 3$ .

Анализ данных показывает, что границы устойчивого горения забалластированного топливного газа в однозонной неохлаждаемой КС сильно зависят от температуры подачи в КС топливного газа. Существует минимальная температура подогретого топливного газа  $T^*$ , при которой начинается устойчивое горение в утилизационной КС. Для каждого состава топливного газа и энергоустановки эта температура имеет свое определенное значение.



**Рис. 2.** Влияние температуры подачи забалластированных нефтяных газов на пределы горения: 1 – коэффициент избытка окислителя на нижнем пределе горения ( $\alpha_n$ ); 2 – коэффициент избытка окислителя в камере сгорания по параметрам установки ( $\alpha_{ГТУ}$ )

**Fig. 2.** Influence of the feed temperature of ballasted petroleum gases on the combustion limits: 1 – oxidizer excess ratio at the lower combustion limit ( $\alpha_{\text{lower}}$ ); 2 – oxidizer excess ratio in the combustion chamber according to the installation parameters ( $\alpha_{\text{GTU}}$ )

На рис. 3 приведены зависимости минимальной температуры подогрева и коэффициента рекуперации подогревателя от процента забалластированности, рассчитанные для энергоустановок с различной степенью сжатия  $\epsilon$  на компрессорах.

Обработка данных показывает, что с увеличением забалластированности НГ требуемая минимальная температура подогрева возрастает. При содержании балластирующих компонентов более 80 % наблюдается интенсивный (резкий) рост этой температуры. По данным [27, 30] увеличение температуры топлив-

ного газа в 2 раза требует увеличения поверхности теплообмена и, соответственно, габаритов в 10 раз. Следовательно, для утилизации подогретого топливного газа с содержанием балластирующих компонентов более 80 % потребуются теплообменные аппараты больших габаритов. Поэтому целесообразна утилизация нефтяных газов с содержанием балластирующих компонентов менее 80 %.

Для разработки универсального теплообменника-подогревателя топливного газа в составе энергоустановки с заданным значением степени сжатия  $\epsilon$  требу-

ется выбрать постоянное значение  $T_{гор.вх}^{КС}$  для утилизации НГ с различным содержанием балластирующих компонентов.

В качестве примера на рис. 4 показан способ выбора значения  $T_{гор.вх}^{КС}$  для энергоустановки со степенью сжатия  $\epsilon=3$ .

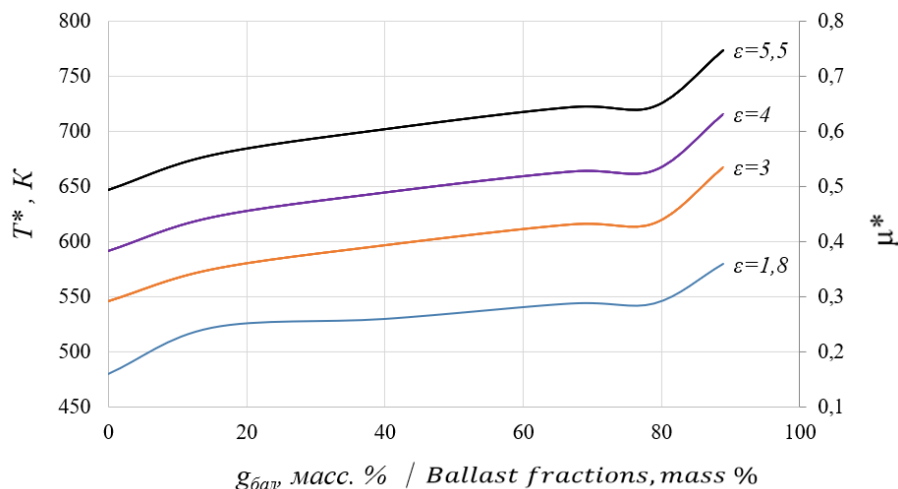


Рис. 3. Режимные параметры подогревателя топливного газа для семейства турбокомпрессоров ( $T^*$  – минимальная температура подогретого топливного газа, при которой начинается устойчивое горение в утилизационной камере сгорания;  $\mu^*$  – коэффициент рециркуляции нагревателя)

Fig. 3. Operating parameters of the fuel gas heater for a family of turbochargers ( $T^*$  – minimum temperature of heated fuel gas at which stable combustion starts in the utilization combustion chamber;  $\mu^*$  – heater recuperation factor)

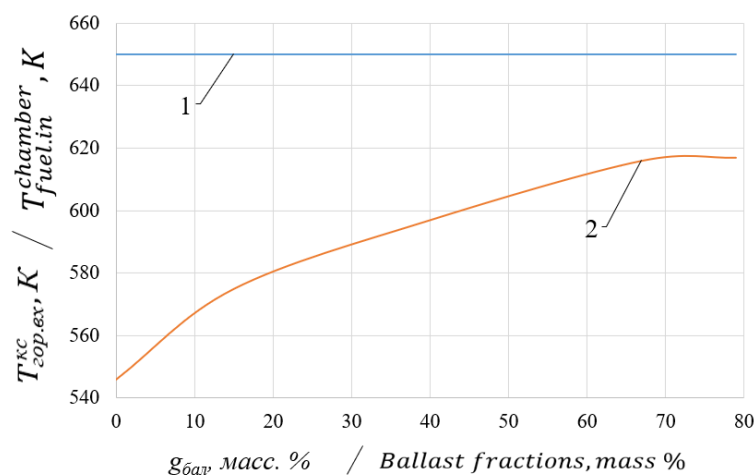


Рис. 4. Выбор постоянной температуры подогрева топливных газов с различными  $g_{бал}$ : 1 – температура горючего на входе в камеру сгорания; 2 – минимальная температура подогретого топливного газа, при которой начинается устойчивое горение в камере сгорания

Fig. 4. Selection of a constant temperature for heating fuel gases with different ballast fractions: 1 – fuel temperature at the inlet to the combustion chamber; 2 – minimum temperature of heated fuel gas at which stable combustion starts in the utilization combustion chamber

Универсальная температура подачи топливного газа в КС  $T_{гор.вх}^{КС}$  выбирается с запасом  $\Delta = T_{гор.вх}^{КС} - T^*$  по отношению к минимальной возможной температуре  $T^*$ . Этот запас уменьшается по мере возрастания забалластированности НГ и минимальный запас  $\Delta_{min} = 5\%$  при  $g_{бал} = 80$  мас. %.

Для каждой энергоустановки с заданной степенью сжатия  $\epsilon$  универсальная температура  $T_{гор.вх}^{КС}$  будет иметь свое значение. На рис. 5 показаны значения этой температуры для семейства энергоустановок с различными степенями сжатия  $\epsilon$ .

С увеличением степени сжатия на компрессоре требуемое значение  $T_{гор.вх}^{КС}$  возрастает. Следовательно, с увеличением мощности утилизационной энергоустановки будут возрастать габариты теплообменника-подогревателя топливного газа. Выбранные значения  $T_{гор.вх}^{КС}$  на рис. 5 носят рекомендательный характер.

На рис. 6 представлены значения  $\alpha_{ГТУ}$ , соответствующие выбранным значениям  $T_{гор.вх}^{КС}$  для энергоустановок различной мощности с различными значениями  $\epsilon$ .

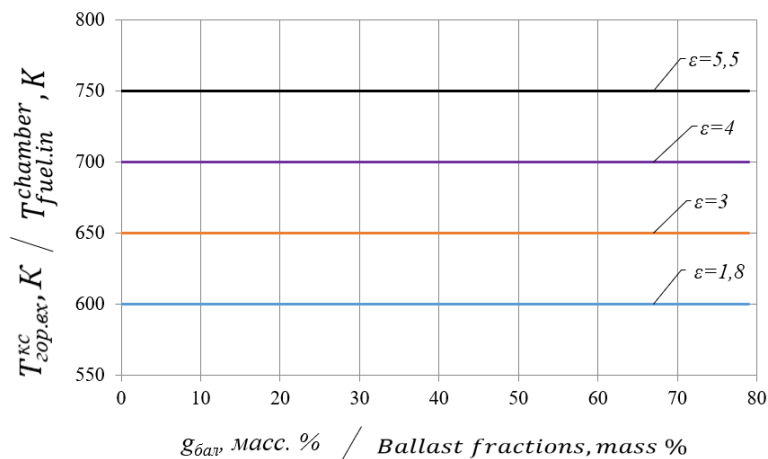


Рис. 5. Рекомендованные значения температуры подогрева нефтяных газов с различными  $g_{балл}$  для семейства турбокомпрессоров

Fig. 5. Recommended temperature values for preheating oil gases with different proportions of ballast for a family of turbochargers

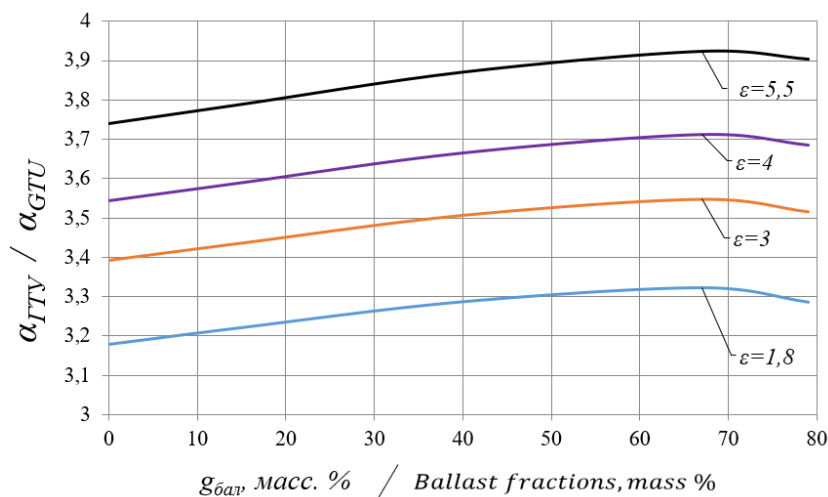


Рис. 6. Коэффициенты избытка окислителя в камере сгорания при утилизации нефтяных газов с различными  $g_{балл}$  для семейства турбокомпрессоров

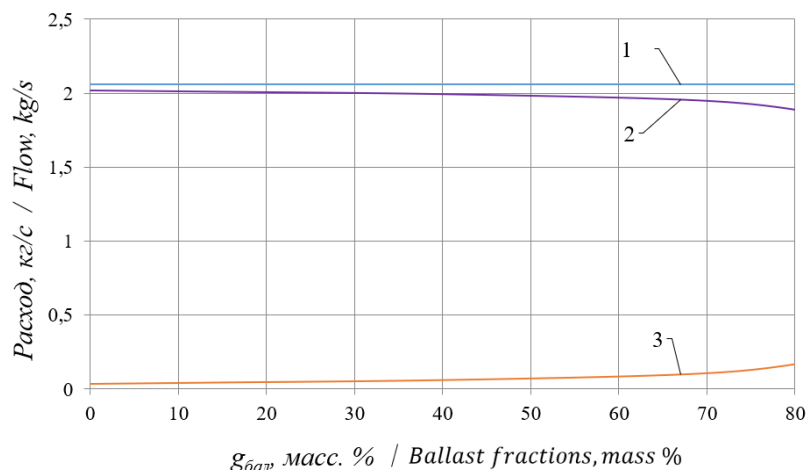
Fig. 6. Excess air ratios in the combustion chamber for the utilization of petroleum gases with different ballast contents for a family of turbochargers

Обработка результатов показывает, что для поддержания постоянной температуры рабочего тела на входе в турбину на каждом месторождении при эксплуатации универсальной ГТУ необходимо будет подбирать определенные значения расхода топливного газа при заданной частоте вращения компрессора.

Проведен параметрический анализ мощностных и расходных характеристик ГТУ при постоянной эффективной работе. При заданной полезной мощности  $N_{пол}$  и постоянной эффективной работе  $L_{пол}$  энергоустановки (при  $\epsilon = const$ ) суммарный расход рабочего тела через турбину  $\dot{m}_{газ}$  зависит только от полезной мощности и не зависит от процента забалластированности. С изменением содержания балластирующих компонентов при  $T_{газ.вх}^T = const$  изменяется потребный коэффициент избытка воздуха  $\alpha_{ГТУ}$ , следовательно изменяются расходы воздуха  $\dot{m}_{ок}$  и топливного газа  $\dot{m}_{гор}$ . Графические зависимости  $\dot{m}_{газ} = f(g_{балл})$ ,  $\dot{m}_{ок} = f(g_{балл})$  и  $\dot{m}_{гор} = f(g_{балл})$  представлены на рис. 7.

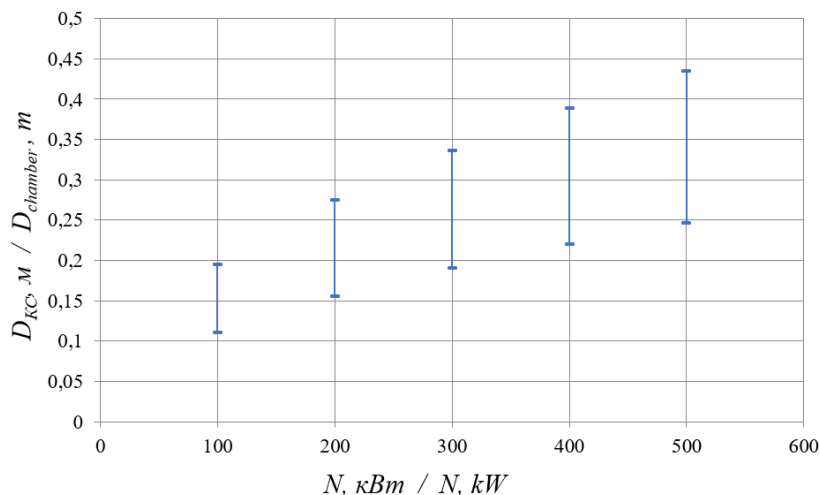
В однозонной КС именно суммарный расход  $\dot{m}_{газ}$  определяет расходную скорость газо-воздушной смеси (ГВС) через поперечное сечение камеры. Для сохранения устойчивости пламени требуется поддержание определенного значения соотношения  $W_{ГВС}/U_t$  между среднерасходной скоростью ГВС и скоростью турбулентного горения, которое в сильной степени зависит от диаметра камеры сгорания. На рис. 8 представлены диаметры камеры сгорания для мощностного ряда ГТУ при утилизации топливных газов с разным содержанием балластирующих компонентов.

Обработка результатов показывает, что для утилизации топливных газов с различным содержанием балластирующих компонентов на разных месторождениях возможно использование универсальной камеры с постоянным диаметром при заданной мощности установки.



**Рис. 7.** Расходные характеристики энергоустановки при сжигании нефтяных газов с различным содержанием балластирующих компонентов при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha=3$  и мощности энергоустановки  $N=300$  кВт: 1 – расход рабочего тела через турбину; 2 – расход окислителя; 3 – расход горючего

**Fig. 7.** Consumption characteristics of the power unit when burning oil gas with different content of ballast components at the oxidizer excess ratio  $\alpha=3$  and power unit capacity  $N=300$  kW: 1 – working body flow through the turbine; 2 – oxidizer flow; 3 – fuel flow



**Рис. 8.** Возможные диаметры камеры сгорания в зависимости от мощности ГТУ

**Fig. 8.** Combustion chamber diameters at different capacities of the gas turbine unit

### Выводы

Исходя из проведенных исследований и обработанных данных можно предложить следующие выводы:

- для обеспечения низкотемпературного бедного малоэмиссионного горения требуется внешний подогреватель топливного газа в составе энергоустановки, параметры которого влияют на режимные параметры камеры сгорания;
- рассмотрено влияние содержания балластирующих компонентов в подогретом топливном газе на коэффициент избытка воздуха и расходные характеристики окислителя и горючего в камере сгорания;

- показано, что при низкотемпературном горении топливного газа в газотурбинной установке заданной мощности с однозонной камерой сгорания устойчивое положение фронта пламени определяется суммарным расходом газо-воздушной смеси и не зависит от процента балласта;
- по условию устойчивого положения фронта пламени определены возможные диапазоны диаметров камеры сгорания для мощностного ряда газотурбинных энергоустановок при утилизации топливных газов с различным содержанием балластирующих компонентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 368 с.
2. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземно-

- го применения. – Самара: Изд-во Самарский научный центр РАН, 2004. – 271 с.
3. Бетинская О.А. Организация рабочего процесса в универсальной камере сгорания газотурбинной установки для утилизации попутного нефтяного газа: дис. ... канд. тех. наук. – Пермь, 2017. – 146 с.

4. Анализ геометрических и тепловых характеристик высокоресурсной утилизационной камеры сгорания / О.О. Матюнин, А.А. Шилова, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 52. – С. 85–96.
5. Massey J.C., Chen Z.X., Swaminathan N. Lean flame root dynamics in a gas turbine model combustor // *Combustion Science and Technology*. – 2019. – V. 191. – P. 1019–1042.
6. Комаров Е.М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // *Машиностроение и компьютерные технологии*. – 2018. – № 5. – С. 9–29.
7. Inanc E., Proch F., Kempf A.M. Studying transient jet flames by high-resolution LES using premixed flamelet chemistry // *Direct and Large-Eddy Simulation XI. ERCOFTAC Series*. – 2019. – V. 25. – P. 237–243.
8. Экспериментальные исследования модельной двужонной малоэмиссионной камеры сгорания ГТУ средней мощности / Л.А. Бульцова, В.Д. Васильев, М.Н. Гутник, К.С. Пугач, М.М. Гутник, А.Л. Берне // *Электрические станции*. – 2019. – № 9 (1058). – С. 2–7.
9. Experimental investigation of NOx emission from a sequential combustor with the kinetic second zone // L.A. Bulysova, V.D. Vasilev, M.N. Gutnik, A.L. Berne // *Thermal Engineering*. – 2019. – V. 66. – № 7. – P. 498–504.
10. Experimental studies of NOx emissions in sequential fuel combustion with a diffusion second zone // L.A. Bulysova, V.D. Vasilev, M.N. Gutnik, A.L. Berne // *Thermal Engineering*. – 2019. – V. 66. – № 6. – P. 402–408.
11. Обеспечение малоэмиссионной работы камеры сгорания в широком диапазоне климатических условий применительно к авиапроизводным ГТУ // Л.А. Бульцова, А.Г. Тумановский, М.Н. Гутник, В.Д. Васильев, А.М. Сипатов, А.Д. Нугуманов // *Электрические станции*. – 2019. – № 12 (1061). – С. 20–22.
12. Расширение пределов горения в пористой горелке с помощью внешнего подогрева / Ал.Ал. Берлин, А.С. Штейнберг, С.М. Фролов, А.А. Беляев, В.С. Посвянский, В.Я. Басевич // *Доклады Академии наук*. – 2006. – Т. 406. – № 6. – С. 1–6.
13. Экспериментальное исследование расширения бедного предела горения метана с помощью внешних воздействий на физико-химические процессы в зоне прогрева пламени / П.А. Гусев, С.М. Фролов, О.Г. Скрипник, А.С. Штейнберг, А.А. Берлин // *Горение и взрыв*. – 2009. – Вып. 2. – С. 7–11.
14. Фролов С.М. Наука о горении и проблемы современной энергетики // *Российский химический журнал*. – 2008. – Т. 52. – № 6. – С. 129–133.
15. Моделирование поверхностного горения на плоской пористой матрице / В.С. Арутюнов, А.А. Беляев, Б.В. Лидский, А.В. Никитин, В.С. Посвянский, В.М. Шмелев // *Горение и взрыв*. – 2018. – Т. 11. – № 3. – С. 12–20.
16. Николаев В.М., Шмелев В.М. Поверхностное горение в объемной матрице из пенометалла с керамическим покрытием // *Горение и взрыв*. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 50–56.
17. Новый тип малоэмиссионных камер сгорания для газотурбинных установок на основе объемных проницаемых матриц / А.Н. Рахметов, В.М. Шмелев, А.А. Захаров, В.С. Арутюнов // *Горение и взрыв*. – 2013. – № 6. – С. 61–64.
18. Рахметов А.Н., Шмелев В.М., Арутюнов В.С. Низкоэмиссионные камеры сгорания ГТУ на основе проницаемых объемных матриц // *Горение и плазмохимия*. – 2013. – Т. 11. – № 2. – С. 83–91.
19. Wierzbka I., Kilchyk V. Flammability limits of hydrogen-carbon monoxide mixtures at moderately elevated temperatures // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2001. – V. 26. – Iss. 6. – P. 639–643.
20. Gibbon H.J., Wainwright J., Rogers R.L. Experimental determination of flammability limits of solvents at elevated temperatures and pressures // *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*. – 1994. – V. 134. – P. 1–12.
21. Effect of low temperature on the flammability limits of methane/nitrogen mixtures / Z. Li, M. Gong, E. Sun, J. Wu, Y. Zhou // *Energy*. – 2011. – V. 36 (9). – P. 5521–5524.
22. Dependence of the lower flammability limit on the initial temperature / T.A. Bolshova, V.A. Bunev, D.A. Knyazkov, O.P. Korobeinichev, A.A. Chernov, A.G. Shmakov, S.A. Yakimov // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2012. – V. 48. – Iss. 2. – P. 125–129.
23. Catoire L., Naudet V. Estimation of temperature dependent lower flammability limit of pure organic compounds in air at atmospheric pressure // *Process Safety Progress*. – 2005. – V. 24 (2). – P. 130–137.
24. Liu Xueling, Zhang Qi Influence of initial pressure and temperature on flammability limits of hydrogen-air // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – V. 39. – Iss. 12. – P. 6774–6782.
25. Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures/ Yu.N. Shebeko, S.G. Tsarichenko, A.Ya. Korolchenko, A.V. Trunev, V.Yu. Navzenya, S.N. Papkov, A.A. Zaitzev // *Combustion and Flame*. – 1995. – V. 102. – Iss. 4. – P. 427–437.
26. Влияние состава и параметров подачи нефтяного газа на пределы горения в утилизационной камере сгорания газа / А.А. Шилова, Р.В. Бульбович, Н.Л. Бачев, О.О. Матюнин // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. – 2020. – № 60. – С. 64–71.
27. Организация низкотемпературного бедного горения утилизируемого газа / Н.Л. Бачев, А.А. Шилова, О.О. Матюнин, Р.В. Бульбович // *Проблемы региональной энергетики*. – 2020. – № 3 (47). – С. 56–68.
28. Шилова А.А., Бачева Н.Ю. Определение коэффициентов избытка воздуха на верхнем и нижнем пределах горения забалластированных нефтяных газов // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. – 2018. – № 53. – С. 77–85.
29. Andrés Z.M., DeJoão A.C. Jr., Christian R.C. Method for determination of flammability limits of gaseous compounds diluted with N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in air // *Fuel*. – 2018. – V. 226. – P. 65–80.
30. Расчетно-экспериментальные исследования концентрационных пределов горения попутных нефтяных газов / Н.Л. Бачев, О.О. Матюнин, Р.В. Бульбович, О.А. Бетинская, А.А. Шилова // *Проблемы региональной энергетики*. – 2019. – № 2 (43). – С. 39–47.

Поступила 22.09.2021 г.

#### Информация об авторах

**Шилова А.А.**, аспирант кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Бачев Н.Л.**, кандидат технических наук, доцент кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 665.612.2

## UTILIZATION OF HETEROGENEOUS PETROLEUM GASES IN A UNIVERSAL LOW-EMISSION GAS TURBINE UNIT WITH EXTERNAL FUEL GAS HEATING

Alena A. Shilova<sup>1</sup>,  
alyona1203@gmail.com

Nikolay L. Bachev<sup>1</sup>,  
bnl54@yandex.ru

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to create domestic gas turbine power plants with a universal low-emission combustion chamber for utilization of petroleum gases with different content of ballast components. Recently, various ways of reducing the emission of harmful substances in gas turbine engines (homogeneous combustion, injection of water or steam, diffusion combustion according to the RQQL scheme, etc.) have been proposed and investigated. In this paper, the authors have proposed and investigated a variant of low-temperature and low-emission combustion with external heating of petroleum gas before its feeding into the utilization combustion chamber.

**Objective:** to develop thermodynamic models for determining the operating parameters of the utilization power plant with fuel gas preheater in its composition and to identify the influence of the degree of oil gas ballast on the excess air and flow characteristics in the combustion chamber for the power range of power plants.

**Objects:** utilization gas turbine power plant, fuel gas preheater, low-emission combustion chamber.

**Methods:** thermodynamic modeling of the utilizing gas turbine unit with oil gas preheater before it is fed into the combustion chamber and thermodynamic calculation of parameters of low-temperature low-emission combustion of depleted gas-air mixture.

**Results.** Operating parameters of the utilization gas turbine unit and fuel gas preheater in its composition were obtained. For petroleum gases with different content of ballasting components, the minimum heating temperatures are determined at which stable combustion is possible. The required values of the excess air ratio and flow characteristics for the family of power plants have been determined. Recommendations are given for the choice of the combustion chamber diameter for the power range of utilizing power plants.

### Key words:

Ballasted fuel gas, low-temperature low-emission combustion, external heating of fuel gas, stable combustion, power range of plants.

### REFERENCES

- Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok* [Fundamentals of designing aircraft engines and power plants]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. Vol. 2, 368 p.
- Gritsenko E.A., Danilchenko V.P., Lukachev S.V. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinye ustanovki nazemnogo primeneniya* [Conversion of aircraft gas turbine engines into ground-based gas turbine units]. Samara, Samara Scientific Center RAN Publ., 2004. 271 p.
- Betinskaya O.A. *Organizatsiya rabochego protsessa v universalnoy kamere sgoraniya gazoturbimoy ustanovki dlya utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza*. Dis. Kand. nauk [Organization of the working process in the universal combustion chamber of a gas turbine unit for utilization of associated petroleum gas. Cand. Diss.]. Perm, 2017. 146 p.
- Matyunin O.O., Shilova A.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V. Analysis of geometric and thermal characteristics of the high-resource utilization combustion chamber. *Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering*, 2018, no. 52, pp. 85–96. In Rus.
- Massey J.C., Chen Z.X., Swaminathan N. Lean flame root dynamics in a gas turbine model combustor. *Combustion Science and Technology*, 2019, vol. 191, pp. 1019–1042.
- Komarov E.M. Metody umensheniya emissii vrednykh veshchestv v kamerakh sgoraniya GTD i GTU [Methods for reducing the emission of harmful substances in the combustion chambers of gas turbine engines and gas turbines]. *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii*, 2018, no. 5, pp. 9–29.
- Inanc E., Proch F., Kempf A.M. Studying transient jet flames by high-resolution LES using premixed flamelet chemistry. *Direct and LargeEddy Simulation XI. ERCOFTAC Series*, 2019, vol. 25, pp. 237–243.
- Bulysova L.A., Vasilyev V.D., Gutnik M.N., Pugach K.S., Gutnik M.M., Berne A.L. Experimental studies of a model two-zone low-emission combustion chamber of a medium-power gas turbine unit. *Electric stations*, 2019, no. 9 (1058), pp. 2–7. In Rus.
- Bulysova L.A., Vasilev V.D., Gutnik M.N., Berne A.L. Experimental investigation of NO<sub>x</sub> emission from a sequential combustor with the kinetic second zone. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no. 7, pp. 498–504.
- Bulysova L.A., Vasilev V.D., Gutnik M.N., Berne A.L. Experimental studies of NO<sub>x</sub> emissions in sequential fuel combustion with a diffusion second zone. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no. 6, pp. 402–408.
- Bulysova L.A., Tumanovskiy A.G., Gutnik M.N., Vasilyev V.D., Sipatov A.M., Nugumanov A.D. Ensuring low-emission operation of the combustion chamber in a wide range of climatic conditions as applied to aircraft-derived gas turbine units. *Electric stations*, 2019, no. 12 (1061), pp. 20–22. In Rus.
- Berlin A.I., Shteynberg A.S., Frolov S.M., Belyayev A.A., Posvyanskiy V.S., Basevich V.Ya. Rasshirenije predelov goreniya v poristoy gorelke s pomoshchyu vneshnego podogreva [Expansion of the limits of combustion in a porous burner using external heating]. *Doklady Akademii nauk*, 2006, vol. 406, no. 6, pp. 1–6.
- Gusev P.A., Frolov S.M., Skripnik O.G., Shteynberg A.S., Berlin A.A. Eksperimentalnoe issledovanie rasshireniya bednogo predela goreniya metana s pomoshchyu vneshnikh vozdeystviy na fiziko-khimicheskie protsessy v zone progrevaniya plameni [Experimental study of the expansion of the lean limit of combustion of methane with the help of external influences on the physicochemical processes in the heating zone of the flame]. *Gorenie i vzryv*, 2009, no. 2, pp. 7–11.
- Frolov S.M. Nauka o goreniy i problem soprovozhdeniya energetiki [Combustion science and problems of modern energy]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, vol. 52, no. 6, pp. 129–133.
- Arutyunov V.S., Belyaev A.A., Lidskiy B.V., Nikitin A.V., Posvyanskiy V.S., Shmelev V.M. Modelirovanie poverkhnostnogo goreniya na ploskoy poristoy matritse [Simulation of surface combustion on a flat porous matrix]. *Gorenie i vzryv*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 12–20.
- Nikolaev V.M., Shmelev V.M. Poverkhnostnoe gorenie v obemnoy matritse iz penometalla s keramicheskimi pokrytiyami

- [Surface combustion in a volumetric foam metal matrix with a ceramic coating]. *Gorenie i vzryv*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 50–56.
17. Rakhmetov A.N., Shmelev V.M., Zakharov A.A., Arutyunov V.S. Novy tip maloemissionnykh kamer sgoraniya dlya gazoturbinnnykh ustanovok na osnove obemnykh pronitsaemykh matrits [A new type of low-emission combustion chambers for gas turbine plants based on volumetric permeable matrices]. *Gorenie i vzryv*, 2013, no. 6, pp. 61–64.
  18. Rakhmetov A.N., Shmelev V.M., Arutyunov V.S. Nizkoemissionnye kamery sgoraniya GTU na osnove pronitsaemykh obemnykh matrits [Low-emission combustion chambers of gas turbines based on permeable volumetric matrices]. *Gorenie i plazmokhimiya*, 2013, vol. 11, no. 2, pp. 83–91.
  19. Wierzbka I., Kilchuk V. Flammability limits of hydrogen-carbon monoxide mixtures at moderately elevated temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, vol. 26, Iss. 6, pp. 639–643.
  20. Gibbon H.J., Wainwright J., Rogers R.L. Experimental determination of flammability limits of solvents at elevated temperatures and pressures. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, 1994, vol. 134, pp. 1–12.
  21. Li Z., Gong M., Sun E., Wu J., Zhou Y. Effect of low temperature on the flammability limits of methane/nitrogen mixtures. *Energy*, 2011, vol. 36 (9), pp. 5521–5524.
  22. Bolshova T.A., Bunev V.A., Knyazkov D.A., Korobeinichev O.P., Chernov A.A., Shmakov A.G., Yakimov S.A. Dependence of the lower flammability limit on the initial temperature. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2012, vol. 48, Iss.2, pp 125–129.
  23. Catoire L., Naudet V. Estimation of temperature dependent lower flammability limit of pure organic compounds in air at atmospheric pressure. *Process Safety Progress*, 2005, vol. 24 (2), pp. 130–137.
  24. Xueling Liu, Qi Zhang. Influence of initial pressure and temperature on flammability limits of hydrogen-air. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, Iss.12, pp. 6774–6782.
  25. Shebeko Yu.N., Tsarichenko S.G., Korolchenko A.Ya., Trunev A.V., Navzenya V.Yu., Papkov S.N., Zaitzev A.A. Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures. *Combustion and Flame*, 1995, vol. 102, Iss. 4, pp. 427–437.
  26. Shilova A.A., Bulbovich R.V., Bachev N.L., Matyunin O.O. Influence of the composition and parameters of oil gas supply on the combustion limits in the gas utilization chamber. *Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering*, 2020, no. 60, pp. 64–71. In Rus.
  27. Bachev N.L., Shilova A.A., Matyunin O.O., Bulbovich R.V. Organization of low-temperature poor combustion of recycled gas. *Problems of the regional energetics*, 2020, no. 3 (47), pp. 56–68. In Rus.
  28. Shilova A.A., Bacheva N.Yu. Determination of excess air coefficients at the upper and lower limits of combustion of ballasted oil gases. *Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering*, 2018, no. 53, pp. 77–85. In Rus.
  29. Andrés Z.M., De João A.C. Jr., Christian R.C. Method for determination of flammability limits of gaseous compounds diluted with N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in air. *Fuel*, 2018, vol. 226, pp. 65–80.
  30. Bachev N.L., Matyunin O.O., Bulbovich R.V., Betinskaya O.A., Shilova A.A. Computational and experimental studies into concentration limits of associated petroleum gas combustion. *Probleme le energetic i regionale*, 2019, no. 2(43), pp. 39–47.

Received: 22 September 2021.

#### Information about the authors

**Alena A. Shilova**, graduate student, Perm National Research Polytechnic University.

**Nikolay L. Bachev**, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.



УДК 622:031. 622:023

## НОВЫЕ ДАННЫЕ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ДОЛГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

Дзюбло Александр Дмитриевич<sup>1</sup>,  
dzyublo.a@gubkin.ru

Бороздин Сергей Олегович<sup>1</sup>,  
borozdin.s@gubkin.ru

<sup>1</sup> Российский Государственный Университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина,  
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, к. 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью сокращения времени строительства скважин на арктическом шельфе ввиду ограниченного по времени сезона навигации и повышения точности при оценке запасов, получаемых по результатам испытания разведочных скважин Долгинского месторождения. Результаты исследования позволяют выбрать оптимальную технологию вскрытия карбонатных пластов-коллекторов Долгинского месторождения, дают возможность обеспечить устойчивость стенок скважины и сохранение коллекторских свойств, установить взаимосвязи коллекторских свойств пород и напряжений в продуктивных пластах, а также обосновать технологические параметры разработки месторождения.

**Цель:** оценка влияния состава, структуры, фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов и действующих напряжений на их проницаемость.

**Объекты:** карбонатные породы-коллекторы нижнепермского и каменноугольного возраста вскрыты скважиной с глубины 2982 м до забоя 3175 м и характеризуются по керну известняками пелитоморфными, органогенно-обломочными и скрытокристаллическими разновидностями.

**Методы.** Исследования проведены современными лабораторными методами, включая ртутную порометрию, метод ядерно-магнитного резонанса, а также уникальный испытательный стенд Института проблем механики РАН.

**Результаты.** На основе количественных данных литолого-петрофизических свойств изучены деформационно-прочностные характеристики пород из вероятно продуктивной части разреза скважины Северо-Долгинская № 1, которая в силу короткого сезона работ в море не испытывалась. Получены данные о структуре порового пространства, акустических свойствах, плотности, пористости и проницаемости (в том числе в пластовых условиях), остаточной водонасыщенности и т. д. Были изучены деформации образцов пород карбонатной залежи по трем направлениям и связь их с проницаемостью в условиях напряженного состояния. Полученные в результате работы новые сведения позволяют более точно подбирать свойства и компонентный состав бурового раствора с целью контроля репрессии, формирования тонкой непроницаемой фильтрационной корки и минимизации физико-химических взаимодействий между фильтратом бурового раствора и пластовыми флюидами.

### Ключевые слова:

Долгинское месторождение, карбонатные коллектора, геомеханика, петрофизика, ядерный магнитный резонанс, трехосное нагружение, проницаемость, порометрия.

### Введение

Значительная часть мировых запасов нефтяных месторождений приурочена к карбонатным коллекторам порово-трещинной структуры, проницаемость которых при изменении напряженно-деформированного состояния в околоскважинной зоне, происходящего при бурении скважин, может изменяться в десятки раз, что окажет существенное влияние на работу скважин. В настоящей статье приведены результаты комплексных исследований карбонатных пород пермокарбонатового возраста Долгинского нефтяного месторождения в Печорском море.

Долгинское нефтяное месторождение находится в Арктике, в центральной части Печорского моря, в 80–110 км от берега. Ближайшие месторождения расположены в 30–80 км к югу либо юго-востоку: Приразломное, Варандей-море и Медыньское-море нефтяные; Северо-Гуляевское нефтегазоконденсатное (рис. 1). Месторождение открыто в 1999 г. в результате испытания карбонатного комплекса нижней перми-верхнего+среднего карбона в поисковой скважине

Южно-Долгинская № 1 в интервале 3288–3327 м. На штуцере 13 мм был получен приток нефти дебитом 168 м<sup>3</sup>/сут. На сегодняшний день на месторождении пробурено четыре поисково-разведочные скважины.

Пласты горных пород в процессе бурения и первичного вскрытия, крепления, вторичного вскрытия и освоения скважины подвергаются целому комплексу различных воздействий. Все вышеуказанные технологические операции нарушают природное состояние массива горных пород. Эти процессы сопровождаются изменением распределения напряжений в прискважинной зоне, приводящим к обрушениям стенок скважин [1–3].

В зависимости от литологического разреза и свойств промывочных жидкостей процессы деформирования могут проявляться в виде кавернообразования, осыпания стенок скважины, гидроразрыва пород и других осложнений, что отрицательно сказывается на проводке скважин, приводит к повышению степени загрязнения призабойной зоны и аварийным ситуациям [4–6].

Устойчивость стенок скважины тесно связана с геомеханическими характеристиками горных пород, структурными особенностями и исходным напряженным состоянием массива. Особую чувствительность к действующим нагрузкам испытывают коллекторы трещинного и трещинно-порового типов [7–9].

На современном этапе развития технологий вскрытия продуктивного пласта особенности поведения карбонатных трещинных пород-коллекторов под нагрузкой учитываются недостаточно, особенно для морских месторождений [10–14].



Рис. 1. Обзорная карта юго-восточной части Печорского моря

Fig. 1. Overview map of the southeastern part of the Pechora Sea

Литолого-петрофизические исследования керна скважины Северо-Долгинская № 1 проводились в РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, ОАО «Тверьгеофизика», ГУП «Арктикоморнефтегазразведка», а геомеханические характеристики были определены в Институте проблем механики РАН. Были определены: открытая пористость (по раствору пластовой воды и по керосину), абсолютная проницаемость (по воздуху), объемная, минералогическая и кажущаяся плотности, остаточная водонасыщенность методом центрифугирования.

Фильтрационно-емкостные и петрофизические свойства пород определялись на образцах керна согласно ГОСТ 26450.1-85 «Породы горные. Метод определения открытой пористости жидкостенасыщением» и ГОСТ 26450.2-85 «Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации».

#### Литолого-петрофизические характеристики коллекторов

В разрезе скважины Северо-Долгинская № 1 породы-коллекторы представлены терригенными и карбонатными разностями. Карбонатные породы-коллекторы

нижнепермского и каменноугольного возраста вскрыты скважиной с глубины 2982 м до забоя 3175 м и характеризуются по керну известняками пелитоморфными, органогенно-обломочными и скрытокристаллическими разностями. Карбонатный разрез в целом характеризуется невысокими фильтрационно-емкостными свойствами, однако вскрыто несколько пластов с повышенными значениями пористости и проницаемости [15–17].

По результатам петрофизических исследований повышенные показатели отмечены для ряда интервалов (табл. 1, 2). По материалам интерпретации ГИС весь интервал разреза от 2987 до 3092 м вероятно продуктивный. Интервал глубин 2992,4–3036,6 м сложен известняками ассель-сакмарского яруса нижней перми, содержащими до 50 % обломков органики. В образцах керна отмечаются поры, имеющие характерные признаки выщелачивания с щетками кальцита на стенках, отмечен резкий запах нефти. По результатам ГИС здесь выделены интервалы с межзерновым и каверново-трещинным типом коллектора. Такая структура пород влияет на их изотропность. Проницаемость образцов, выпиленных из керна параллельно напластованию (П), несколько выше, чем перпендикулярно (Л) напластованию.

**Таблица 1.** Сводная таблица средних значений открытой пористости ( $K_n$ ) и абсолютной проницаемости ( $K_{np}$ ) карбонатных пород (известняков) скважины Северо-Долгинской № 1

**Table 1.** Summary table of average values of open porosity ( $K_n$ ) and absolute permeability ( $K_{np}$ ) of carbonate rocks (limestones) of well Severo-Dolinskaya no. 1

Интервалы глубин по ГИС (м) GIS depth intervals (m)	$K_n$ по керосину (%) $K_n$ for kerosene (%)	$K_n$ по раствору (%) $K_n$ for solution (%)		$K_{np}$ (10–15 мД) $K_{np}$ (10–15 mD)	
		II (паралл. напласт. parallel to bed)	I (перпен. напласт. perpendicular to bed)	II (паралл. напласт. parallel to bed)	I (перпен. напласт. perpendicular to bed)
2982–2995 2996–3048	—1,6— 0,1–5,3 (111)	—1,3— 0,4–3,4 (81)	—1,2— 0,2–3,7 (42)	—0,51— 0,01–11,93 (85)	—0,04— 0,01–0,41 (45)
2994,8–2996,6	—18,3— 13,8–21,9 (4)	—18,1— 13,8–21,1 (4)	—21,6— 12,3–30,2 (3)	—215,93— 35,54–441,61 (4)	—140,98— 21,26–283,52 (3)
3048–3068	—2,1— 0,3–6,7 (36)	—2,3— 0,4–7,5 (29)	—1,7— 0,3–4,0 (26)	—0,07— 0,01–0,56 (29)	—0,01— 0,01–0,09 (27)
3068–3090	—2,4— 0,3–5,9 (39)	—1,3— 0,2–4,9 (50)	—1,4— 0,3–5,1 (46)	—0,05— 0,01–1,52 (52)	—0,02— 0,01–0,28 (48)

в числителе – среднее значение; в знаменателе – диапазон значений; в скобках – число образцов.

the numerator is the average value; the denominator is the range of values; in brackets – number of samples.

**Таблица 2.** Результаты исследования образцов керна скважины Северо-Долгинская № 1

**Table 2.** Results of core samples testing from well Severo-Dolinskaya no. 1

№ лабор. Lab no.	Глубина, м Depth, m		Краткое название породы Rock short name	Открытая пористость, % Open porosity, %			Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>				Проницаемость, мД Permeability, mD	
	по бурению/drilling	по ГИС/LWD		по керос. (паралл.+куб) kerosene (parallel+cube)	по раствору (паралл. напласт.) solution (parallel)	по раствору (перпен. напласт.) solution (perpendicular)	объёмная (паралл.+куб) bulk (parallel + cube)	объёмная (перпен. напласт.) bulk (perpendicular to bed)	минералогич./mineralogical	минералогич. (кажущ.) mineralogical (apparent)	(паралл. напласт.) (parallel to bed)	(перпен. напласт.) (perpendicular to bed)
СД1-111-99	2993,25	2988,25	изв./limestone	0,5	–	–	2,7	–	–	2,71	–	–
СД1-112-99	2993,7	2988,7		0,3	0,4	–	2,68	–	2,71	2,69	<0,01	–
СД1-113-99	2993,9	2988,9		0,2	0,4	–	2,69	–	2,73	2,7	0,5	–
СД1-127-99	2999,4	2994,4		1,6	1,3	–	2,65	–	2,72	2,7	0,01	–
СД1-128-99	2999,75	2994,75		21,9	21,1	22,2	2,1	2,09	2,70	2,69	348,47	283,52
СД1-129-99	2999,95	2994,95		16,9	–	–	2,24	–	2,73	2,7	–	–
СД1-169-99	3014,5	3009,5		5,3	5	–	2,46	–	2,64	2,59	1,78	–
СД1-175-99	3017,2	3012,2		3,2	2,2	–	2,61	–	2,70	2,69	0,38	0,18
СД1-176-99	3017,6	3012,6		2,7	1,8	2	2,62	2,63	2,70	2,69	<0,01	<0,01
СД1-213-99	3034,1	3029,1		1,3	1,1	–	2,66	–	–	2,69	0,11	–
СД1-214-99	3034,15	3029,15		3	1,9	–	2,62	–	2,70	2,69	0,13	–
СД1-222-99	3038,2	3033,2		0,6	–	–	2,7	–	–	2,71	–	–
СД1-237-99	3044,4	3039,4		0,5	0,5	0,4	2,69	2,7	2,72	2,69	<0,01	<0,01

**Результаты исследования методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР)**

Исследования методом ядерно-магнитного резонанса проводились комплексно (табл. 3). ЯМР спектрометром «CoreSpec-1000» на полномасштабном керне выполнено определение общей пористости ( $K_n$ ) и ее каверновой составляющей ( $K_{п.кав}$ ), оценка модельной остаточной водонасыщенности ( $K_{во}$ ), расчет статистических распределений пор по размерам. Расчет каверновой составляющей общей пористости выполнен путем оцифровки разрезанных пластин и получения видеоизображения в системе «VIDIOLAB». Проницаемость измерялась в двух горизонтальных и одном вертикальном направлении. Определение минералогической плотности по гелию на приборе «AcuPys-1330».

Результаты измерений, приведенные в табл. 3, показывают распределение пористости и проницаемости в исследуемом интервале. Структура порового пространства известняков формируется за счет не только межзерновой, но и каверновой и трещинной составляющей. Например, образец с глубины 2999,82 м имеет пористость  $K_n=21,29$  %, которая является суммой пористости глинистой составляющей ( $K_{п.гл}$ ), пор, заполненных связанной водой ( $K_{п.св.в}$ ), эффективной пористости ( $K_{п.эф}$ ) и каверновой пористости ( $K_{п.кав}$ ). Такой образец обладает высокой проницаемостью  $K_{np}$  230,1 мД и низкой остаточной водонасыщенностью 34,66 %, что характерно для коллекторов высокого класса. Результаты расчета статистических распределений пор по размерам на представительной выборке в интервале глубин 2988,3–3050,8 м показаны на рис. 2.

**Таблица 3.** Результаты исследования образцов керн на ЯМР-спектрометре, скважина Северо-Долгинская № 1

**Table 3.** Results of examining core samples on an NMR spectrometer, well Severo-Dolginskaya no. 1

Глубина, м Depth, m	$K_{п,г}$ Porosity, %	$K_{п,г,г}$ Porosity (clay), %	$K_{п,св}$ Porosity ( $S_{wir}$ ), %	$K_{п,эф}$ Eff. porosity, %	$K_{п,вуг}$ Vug. porosity, %	$K_{пр}$ , мД Permeability, mD	$K_{пр}/S_{эф}$ , %
2993,22	0,49	0,06	0,39	0,04	0	0,07	91,84
2993,22	0,75	0,04	0,5	0,21	0	0,22	72
2995,07	1,01	0,54	0,29	0,18	0	0,12	82,18
2995,07	1,08	0,64	0,31	0,13	0	0,38	87,96
2999,15	11,95	0,23	5,52	6,07	0,13	65,13	48,12
2999,15	13,16	0,28	5,65	6,19	1,04	39,4	45,06
2999,82	21,29	0,29	7,09	12,98	0,93	230,1	34,66
3014,89	3,73	0,24	2,17	1,03	0,29	0,99	64,61
3016,26	2	1,37	0,6	0,03	0	0,04	98,5
3016,31	2,62	0,15	1,54	0,73	0,2	0,44	64,5
3016,68	2,68	0,02	1,04	1,51	0,11	3,46	39,55
3016,74	2,42	0,01	1,15	1,22	0,04	2,71	47,93
3018,33	2,6	0	0,73	1,6	0,27	2,85	28,08
3034,53	2,18	0,03	1,45	0,7	0	1,7	67,89
3034,63	2,15	0,06	1,52	0,57	0	0,95	73,49
3038,86	1,08	0,02	0,65	0,41	0	0,17	62,04
3044,84	1,72	0,1	0,87	0,75	0	1,61	56,4

Из рис. 3 видно, что средняя эффективная пористость равна 1,12 %, а в отдельных прослоях достигает 12–14 %.

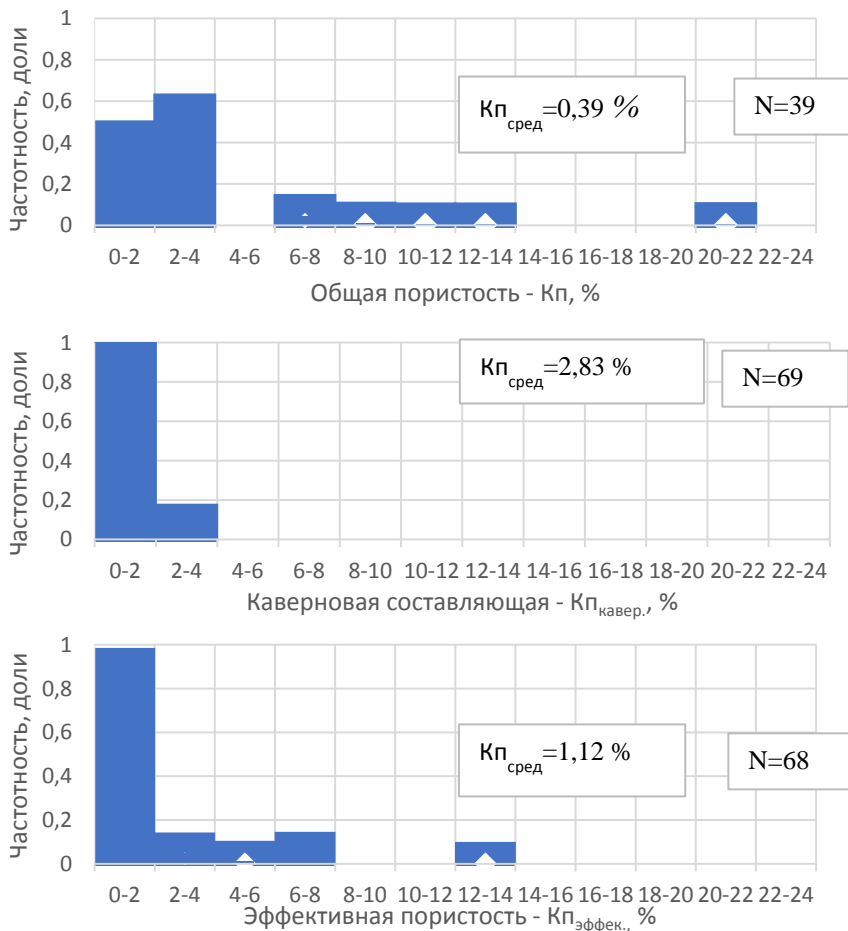
**Ртутная порометрия**

Структура порового пространства коллекторов скважины Северо-Долгинская № 1 изучалась также методом ртутной порометрии на ограниченной коллекции образцов известняков.

Нагнетание ртути в проницаемую породу основывается на уравнении Лапласа, определяющем соотношение капиллярного давления несмачивающей жидкости и размеров порового канала. В результате получают кривые зависимости объема ртути, вдуваемой в породу, от давления нагнетания при его ступенчатом повышении.

Работами специалистов в области физики пласта и петрофизики установлена тесная связь распределения пор по размерам с проницаемостью и водонасыщенностью коллекторов нефти и газа различных месторождений [18–20].

Методом ртутной порометрии было изучено 15 образцов известняка, полученных из скважины № 1 Северо-Долгинская из интервала отбора керн 2990,24–3084,23 м. Измерения проводились на ртутном порометре «Auto-pore 9200» [21].



**Рис. 2.** Распределение пористости карбонатных коллекторов продуктивного интервала 2988,3–3050,8 м в скв. Северо-Долгинская № 1

**Fig. 2.** Porosity distribution of carbonate reservoirs in the productive interval 2988,3–3050,8 m in the well Severo-Dolginskaya no. 1

Лабораторные исследования показали следующие результаты:

- измеренная открытая пористость образцов находится в диапазоне 0,05–1,28 %;
- в некоторых образцах с глубин 2990,24 и 2990,97 м определено наличие закрытых пор диаметром  $d_{\text{пор}} < 0,01$  мкм.

Результаты измерений показывают, что в изученной выборке, несмотря на небольшое количество образцов, присутствуют отдельные высокопроницаемые экземпляры, в которых объем пор в диапазоне 70–300 мкм составляет 10 %, что способствует фильтрации жидкости и газа в пласте (рис. 3).

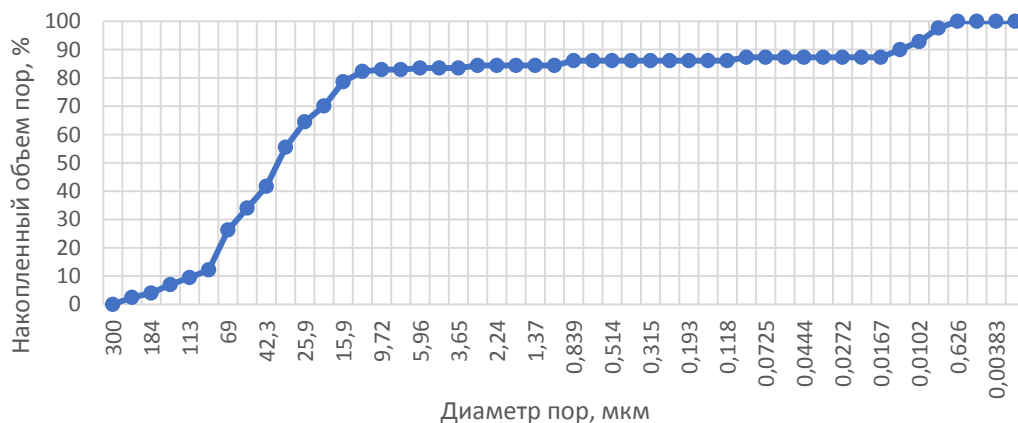


Рис. 3. Диаграмма распределения пор по размерам по данным ртутной порометрии образца с глубины 2998,82 м скважины Северо-Долгинская № 1

Fig. 3. Pore size distribution diagram according to mercury porosimetry data of a sample from a depth of 2998,82 m in the Severo-Dolinskaya well no. 1.

#### Исследование деформационных и прочностных характеристик

На кернах Долгинского месторождения были проведены исследования геомеханических свойств на испытательной установке ИПМ РАН по двум сценариям испытаний.

Установка для создания трехосного независимого нагружения позволяет изучать деформационные, прочностные и фильтрационные характеристики горных пород. Преимуществом данной установки является возможность изучения влияния действующих напряжений на проницаемость.

Таблица 4. Результаты изучения влияния изменения напряжений на проницаемость карбонатных пород скважины Северо-Долгинская № 1

Table 4. Results of studies of the influence of stress changes on the permeability of carbonate rocks of the well Severo-Dolinskaya no. 1

№ обр. Sample no	Глубина, м Depth, m	Программа испытаний Test programme	Начальная проницаемость, мД Initial permeability, mD	Проницаемость при всестороннем сжатии 40 МПа, мД Permeability at confined pressure 40 MPa, mD	Максимальное нагружение, МПа Maximal stress, MPa
440	2993,09	1	0,34	0,017	88
445/1	2999,67	2	243	194	–
445/2	2999,67	1	188	–	<40
457	3014,85	2	0,02	0,003	80
462	3017,12	1	2,6	0,26	–
480	3034,52	2	0,006	–	130
485	3038,86	2	0,06	0,003	60
489	3044,78	2	0,001	–	130

Методика проведения исследований рассмотрена в работах [22–24], поэтому остановимся на основных результатах и характеристиках пород.

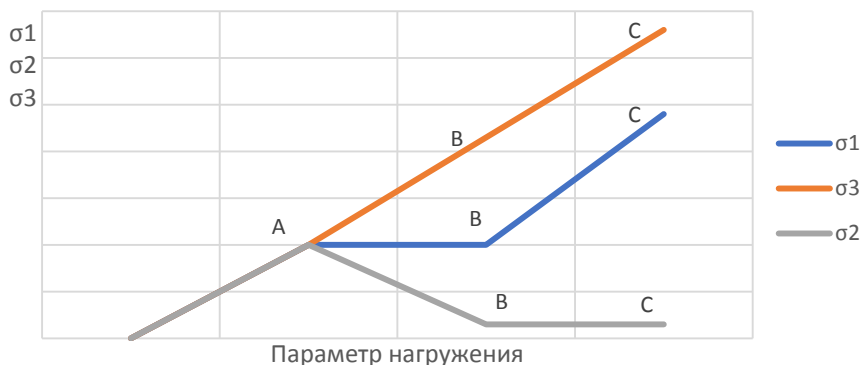
Используя технические возможности установки, были изучены деформационные и прочностные характеристики горных пород на коллекции образцов (табл. 4) и зависимости их проницаемости от уровня и соотношения действующих напряжений. При исследовании влияния напряжений на проницаемость горных пород использован метод прямого измерения проницаемости. До испытания на прессе были измерены начальные проницаемости всех образцов в плоскости, перпендикулярной оси скважины (табл. 4).

По двум программам исследовалось напряженное состояние, возникающее в породе вокруг скважины и вблизи перфорационных отверстий.

#### Сценарий 1 – изменение напряжений в околоскважинной зоне

Методика испытаний по сценарию 1 показана на рис. 4. Напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  соответствуют напряжениям  $\sigma_z$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_\theta$  в околоскважинной зоне.

**Стадия 1.** Все напряжения одновременно увеличивают до значения, равного разности горного и пластового давления на глубине отбора керна (отрезок ОА на рис. 5). Точка А характеризует напряжения в горной породе до бурения скважины. Горное давление на Северо-Долгинском месторождении на глубине порядка 3 км составляет 70 МПа, пластовое давление нефти 30 МПа, следовательно, эффективное давление составляет 40 МПа. Испытания проводились для двух значений  $\delta$ :  $\delta=0$ ,  $\delta=0,2$ .



**Рис. 4.** Диаграмма напряжений по программе 1  
**Fig. 4.** Stress diagram for programme 1

**Стадия 2.** Затем (отрезки АВ) продолжали увеличивать напряжение  $\sigma_3$ ,  $\sigma_1$  при этом оставалась постоянной (равной 40 МПа для  $\delta=0$  и 46 МПа для  $\delta=0,2$ ), а  $\sigma_2$  постепенно уменьшали. Основным условием было поддержание среднего напряжения  $\sigma=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$  на всем протяжении второй стадии постоянным. Точка В описывает состояние, когда бурение скважины завершено, и она заполнена технической водой. Давление на забое 30 МПа, а напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 40 \text{ МПа}, \sigma_2 = 80 \text{ МПа}, \sigma_3 = 0 \text{ для } \delta=0, \\ \sigma_1 &= 46 \text{ МПа}, \sigma_2 = 86 \text{ МПа}, \sigma_3 = 6 \text{ МПа для } \delta=0,2. \end{aligned}$$

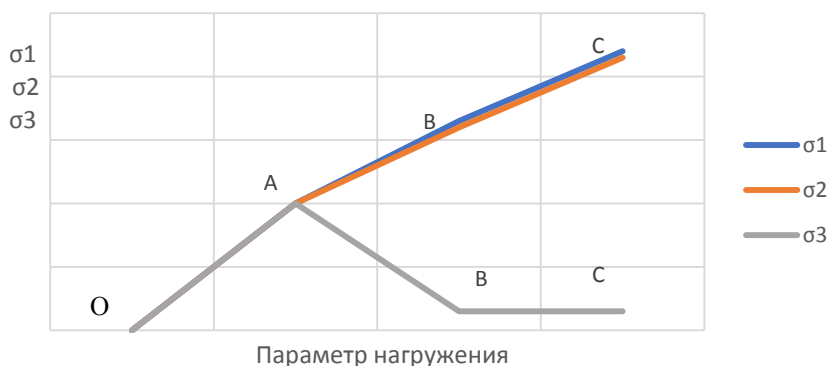
**Стадия 3.** Данная стадия воспроизводит процесс снижения давления в скважине при ее освоении (отрезки ВС на рис. 5). Радиальное напряжение  $\sigma_R$  под-

держивается постоянным, а остальные напряжения возрастают. Важно отметить, что кольцевые напряжения возрастают в два раза быстрее. Третья стадия продолжалась до тех пор, пока образец сохранял целостность.

В процессе исследований проводились замеры проницаемости образца и деформации в трех направлениях.

#### Сценарий 2 – изменение напряжений вокруг перфорационных каналов

Последовательность испытаний по сценарию 2 приведена на рис. 5. Здесь напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , действующие по осям образца, соответствуют напряжениям  $\sigma_\varphi, \sigma_\theta, \sigma_R$  вблизи перфорационного отверстия.



**Рис. 5.** Диаграмма напряжений по программе 2  
**Fig. 5.** Stress diagram for programme 2

**Стадия 1.** Увеличение всестороннего давления до 40 МПа для  $\delta=0$  или до 46 МПа для  $\delta=0,2$  (отрезок ОА).

**Стадия 2.** Окружные напряжения продолжают возрастать, в то время как радиальное напряжение снижается (отрезки АВ на рис. 5). Среднее значение напряжения поддерживается постоянным на уровне 40 МПа для  $\delta=0$  и 46 МПа для  $\delta=0,2$ . Завершение второй стадии имитирует напряжения вокруг перфорационных каналов перед началом эксплуатации скважины. В точке В напряжения равны:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_2 = 60 \text{ МПа}, \sigma_3 = 0 \text{ для } \delta=0, \\ \sigma_1 &= \sigma_2 = 66 \text{ МПа}, \sigma_3 = 6 \text{ МПа для } \delta=0,2. \end{aligned}$$

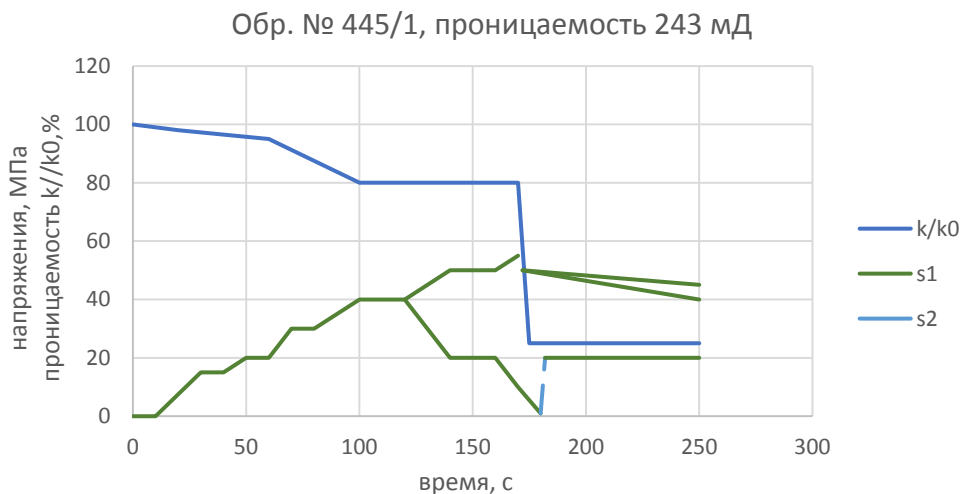
**Стадия 3.** Радиальное напряжение остается равным нулю, а другие два компонента напряжения про-

должают возрастать. Данная стадия имитирует понижение давления в скважине, что сопровождается дальнейшим изменением напряжений.

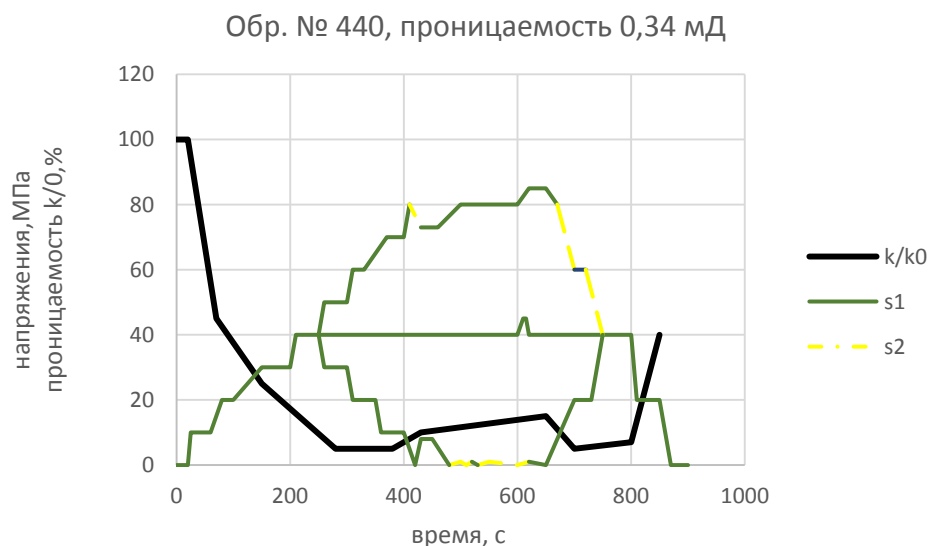
При испытаниях регистрировались те же самые параметры, что и при работе по первому сценарию.

На рис. 6–8 наиболее показательные результаты исследований, проведенных по указанным выше сценариям. На каждом рисунке изображены:

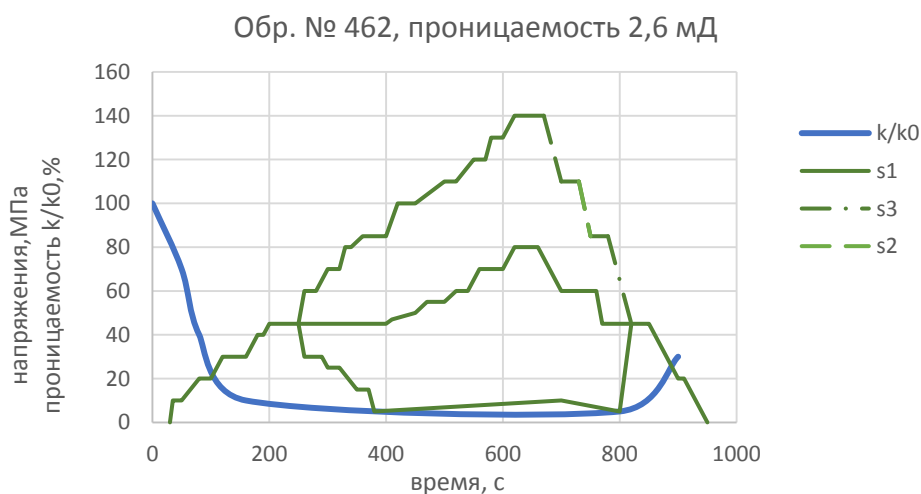
- сценарий нагружения образца (ось 1 направлена вдоль оси скважины);
- деформации образца;
- изменение проницаемости образца в ходе исследования [16].



**Рис. 6.** Изменение проницаемости в зависимости от напряжений для образца 445/1  
**Fig. 6.** Change in permeability depending on stresses for sample 445/1



**Рис. 7.** Изменение проницаемости в зависимости от напряжений для образца 440  
**Fig. 7.** Change in permeability depending on stresses for sample 440



**Рис. 8.** Изменение проницаемости в зависимости от напряжений для образца 462  
**Fig. 8.** Change in permeability depending on stresses for sample 462

### Обсуждение результатов

В настоящей работе приведены результаты комплексных геомеханических и петрофизических исследований керна Долгинского нефтяного месторождения, из которых очевидна взаимосвязь состава, коллекторских свойств и структуры карбонатных пород с проницаемостью, в том числе в условиях напряженного состояния.

Из всего исследуемого интервала 2982–3090 м максимальные значения пористости и проницаемости наблюдаются в интервале 2994–3000 м и достигают, соответственно, 18,3 % и 215,93 мД. При этом структура порового пространства включает эффективную, каверновую, глинистую пористость, кроме того, часть пор заполнена связанной водой.

Результаты ртутной порометрии показали, что более 80 % пор имеют размеры 15 до 300 мкм, при этом 70 % пор находятся в диапазоне от 15 до 69 мкм.

Исследования на установке ИСТНН коллекции образцов керна скважины Северо-Долгинская № 1 показали, что только образец 445 с глубины 2999,67 обладал значительной проницаемостью. Характер его деформации и разрушения, а также изменение проницаемости при нагружении существенно отличны от других образцов. Это означает, что высокопористые известняки, слагающие пласт, менее устойчивы и склонны к осыпаниям и обвалам.

Образцы с низкой проницаемостью визуально характеризуются заметной внешней трещиноватостью, с чем связано, очевидно, резкое падение проницаемости при их всестороннем равномерном обжатии. Разрушению образцов предшествовала их незначительная пластическая деформация, а само разрушение носило хрупкий характер и происходило путем образования нескольких макротрещин.

На поверхности образца 445 внешняя трещиноватость отсутствовала, а при всестороннем равномерном обжатии его проницаемость уменьшилась незначительно. При напряжениях, отвечающих незначительной депрессии, началась интенсивная ползучесть образца, сопровождавшаяся существенным падением его проницаемости.

Опыты позволяют сделать вывод, что структуре породы отвечает значение параметра  $\delta=0,2$ , т. е. суммарная площадь площадок контактов зерна с соседними зернами составляет примерно 20 % площади всей его поверхности.

Все образцы коллекции (за исключением образца 462) в ходе опытов разрушились. В испытаниях со значением параметра  $\delta=0,2$  разрушение происходило при напряжениях, соответствующих депрессии на забое скважины 25–30 МПа.

Результаты измерения проницаемости при изменении напряженного состояния показывают снижение в среднем на 80 % по сравнению с начальной проницаемостью. Притом, в большинстве экспериментов это снижение происходило еще на этапе возрастания напряжений, и только образец, обладающий максимальной начальной проницаемостью, продемонстрировал снижение только на 20 % на протяжении периода возрастания и стабилизации напряжений.

### Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют решить следующий ряд задач, связанных с бурением скважин в карбонатных залежах Печорского моря на Долгинском и других аналогичных месторождениях:

- 1) более точное планирование и расчет перепада забойного и пластового давлений для сохранения устойчивости стенок скважины при первичном вскрытии продуктивных отложений;
- 2) подбор оптимального фракционного состава утяжелителя для создания тонкой непроницаемой фильтрационной корки;
- 3) подбор компонентного состава бурового раствора, минимизирующего физико-химические процессы при контакте фильтрата раствора со скелетом породы и пластовыми флюидами;
- 4) обоснование максимальной репрессии на продуктивный пласт для минимизации глубины проникновения фильтрата бурового раствора в продуктивный пласт с целью сохранения коллекторских свойств;
- 5) определение оптимального режима вызова притока при освоении скважины и максимально допустимой депрессии на пласт;
- 6) повышение точности прогнозирования добычи с учетом зависимости проницаемости продуктивного пласта от действующих напряжений в пласте;
- 7) уточнение объема запасов нефти на Долгинском месторождении с учетом особенностей структуры порового пространства коллектора и распределения пор по размерам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев М.М., Лутфуллин А.А., Исмагилова З.Ф. Нефтегазовая геомеханика. – М.: Инфра-Инженерия, 2020. – 160 с.
2. Ottesen S., Zheng R.H., McCann R.C. Borehole stability assessment using quantitative risk analysis // Society of Petroleum Engineers. – 1999. – P. 1–4. DOI: 10.2118/52864-MS
3. Hamid O., Osman H., Alamer S. Enhanced assessment of stress dependent permeability of sandstone rock // Society of Petroleum Engineers. – 2018. – P. 1–9. DOI: 10.2118/192605-MS
4. Баклашов И.В., Геомеханика. Т. I. Основы геомеханики. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. – 280 с.
5. Clarke H., Soroush H. Anisotropic borehole stability analysis for the first horizontal shale gas well in the Bowland Basin //

Unconventional Resources Technology Conference. – Денвер, Колорадо, США, 2019. – P. 3917–3928. DOI: 10.15530/urtec-2019-15

6. Van Oort E., Nicholson J., D'Agostino J. Integrated borehole stability studies: key to drilling at the technical limit and trouble cost reduction // Society of Petroleum Engineers. – 2001. – P. 1–13. DOI: 10.2118/67763-MS
7. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Влияние добычи нефти в упругом режиме на изменение НДС горного массива. Ч. 1. Анализ инструментальных наблюдений. Модель деформирования нефтяного коллектора под нагрузкой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1998. – № 5. – С. 71–80.
8. Технология бурения нефтяных и газовых скважин / В.П. Овчинников, Ф.А. Агзамов, Н.А. Аксенова, А.Е. Анашкина,



- Д.С. Герасимов, А.С. Оганов, С.Л. Симонянц / под общ. ред. В.П. Овчинникова. В 5 т. Т. 3. Вскрытие и разобшение. 2-е изд., перераб. и доп. – Тюмень: ТИУ, 2017. – 342 с.
9. Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations // Society of Petroleum Engineers. – 2001. – P. 1–6. DOI: 10.2118/56017-PA
  10. Оганов С.А., Оганов Г.С. Технология бурения наклонно направленных скважин с большим отклонением забоя от вертикали. – М.: ВНИИОЭНГ, 2008. – 220 с.
  11. Кузнецов В.Г., Куванаев Р.М. Обзор современных методов обеспечения устойчивости стенок скважины // Журнал Neftegaz.RU. URL: <https://neftegaz.ru/analysis/equipment/328580-obzor-sovremennykh-metodov-obespecheniya-ustoychivosti-stenok-skvazhiny> (дата обращения 09.11.2020).
  12. Al Balushi F., Dahi Taleghani A. Numerical generation of stress-dependent permeability curves // American Rock Mechanics Association. – 2020.
  13. Stress-dependent permeability and porosity in three forks carbonate reservoir, Williston Basin / A. Boualam, V. Rasouli, C. Dalkhaa, S. Djezzar // American Rock Mechanics Association. – 2020.
  14. Formation evaluation with NMR, resistivity and pressure data; a case study of a carbonate oilfield offshore West Africa / T. Li, N. Drinkwater, K. Whittlesey, P. Condon // Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. – 2020.
  15. Дзюбло А.Д. Нефтегазоносность и геолого-геофизические модели шельфа Российской Арктики и Дальнего Востока. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2018. – 235 с.
  16. Дзюбло А.Д., Зонн М.С. Строение разрезов и нефтегазоносность визейско-нижнепермского нефтегазоносного комплекса Долгинского вала в акватории Печорского моря // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2004. – № 9. – С. 18–23.
  17. Захаров Е.В., Реутская Н.В. Основные результаты комплексной интерпретации данных по поисковым скважинам на восточном шельфе Печорского моря // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5. – С. 2–8.
  18. Дзюбло А.Д. Удельная поверхность пород-коллекторов в нефтегазовой геологии // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 12. – С. 60–66.
  19. Дзюбло А.Д., Топорков В.Г., Рудаковская С.Ю. Применение новых технологий исследования керна скважин арктического шельфа // ООО «Газфлот» 10 лет на арктическом шельфе. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – С. 191–207.
  20. Behera Chaitanya et al. Integrated decision based planning with data centric approach: a novel way for successful delivering of a lean FDP for a complex carbonate reservoir, North Oman // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 2018. DOI: 10.2118/193204-MS
  21. Дзюбло А.Д. Геолого-геофизические исследования и модели природных резервуаров Баренцево-Карского региона с целью наращивания ресурсной базы углеводородов: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2009. – 267 с.
  22. Отчет о проведении испытания десяти образцов керна материала из скв. № 1 структуры Северо-Долгинская с целью оценки возможности сохранения или повышения проницаемости в прискважинной области в условиях вторичного вскрытия продуктивных объектов / Ю.Ф. Коваленко, Ю.В. Кулинич, В.И. Карев, М.Ю. Титоров. – М.: ООО «НИЦ «Геомеханика и технология», 1999. – 55 с.
  23. Карев В.И. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс и дебит скважин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 2010. – 33 с.
  24. Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М., 2012. – 314 с.

Поступила 22.09.2021 г.

#### Информация об авторах

**Дзюбло А.Д.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры освоения морских нефтегазовых месторождений, Российский Государственный Университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

**Бороздин С.О.**, старший преподаватель кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Российский Государственный Университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

UDC 622:031.622:023

## NEW DATA OF A COMPREHENSIVE GEOMECHANICAL AND PETROPHYSICAL STUDY OF THE DOLGINSKOE FIELD RESERVOIR PROPERTIES

Alexander D. Dzublo<sup>1</sup>,  
dzyublo.a@gubkin.ru

Sergey O. Borozdin<sup>1</sup>,  
borozdin.s@gubkin.ru

<sup>1</sup> Gubkin University,  
65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to reduce well drilling time on the Arctic shelf due to the limited navigation season and increased accuracy in assessing reserves obtained from the results of testing exploratory wells at the Dolginskoe field. The research results make it possible to select the optimal technology for drilling carbonate reservoirs of the Dolginskoe field, as well as to ensure the stability of the wellbore and preserve reservoir properties, establish the relationship between reservoir properties of rocks and stresses in productive formations, and justify the technological parameters of field development.

**The purpose** of the research is to assess the influence of the composition, structure, filtration-capacitive properties of reservoir rocks and acting stresses on their permeability.

**Objects.** Carbonate reservoir rocks of the Lower Permian and Carboniferous age were drilled in a well from a depth of 2982 m to a bottomhole of 3175 m and are characterized by pelitomorphous limestones, organogenic-detrital and cryptocrystalline varieties.

**Methods.** The research was carried out by modern laboratory methods, including mercury porosimetry, the method of nuclear magnetic resonance, as well as a unique test bench of the Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences.

**Results.** On the basis of quantitative data of lithological and petrophysical properties, the authors have studied the deformation and strength characteristics of rocks from the probably productive part of the section of the Severo-Dolginskaya no. 1 well, which was not tested due to the short season of offshore operations. The data were obtained on the structure of the pore space, acoustic properties, density, porosity and permeability (including in reservoir conditions), residual water saturation, etc. The deformations of samples of rocks of a carbonate deposit in three directions and their relationship with permeability under stress conditions were studied. The new information obtained as a result of the work makes it possible to more accurately select the properties and component composition of the drilling fluid in order to control the represson, the formation of a thin impermeable filter cake, and to minimize the physicochemical interactions between the mud filtrate and formation fluids.

### Key words:

Dolginskoe field, carbonate reservoirs, geomechanics, petrophysics, nuclear magnetic resonance, triaxial loading, permeability, porosimetry.

### REFERENCES

1. Aliev M.M., Lutfullin A.A., Ismagilova Z.F. *Neftegazovaya geomekhanika* [Oil and gas geomechanics]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020. 159 p.
2. Ottesen S., Zheng R.H., McCann R.C. Borehole stability assessment using quantitative risk analysis. *Society of Petroleum Engineers*, 1999 November 1, pp. 1–4. DOI: 10.2118/52864-MS.
3. Hamid O., Osman H., Alamer S. Enhanced assessment of stress dependent permeability of sandstone rock. *Society of Petroleum Engineers*, 2018, November 12, pp. 1–9. DOI: 10.2118/192605-MS
4. Baklashov I.V. *Geomekhanika. T. I. Osnovy geomekhaniki* [Geomechanics. Vol. I. Fundamentals of Geomechanics]. Moscow, Moscow State Mining University Publ. house, 2005. 280 p.
5. Clarke H., Soroush H. Anisotropic borehole stability analysis for the first horizontal shale gas well in the Bowland Basin. *Unconventional Resources Technology Conference*. Denver, Colorado, USA, 2019, July 25. pp. 3917–3928. DOI: 10.15530/urtec-2019-15
6. Van Oort E., Nicholson J., D'Agostino J. Integrated borehole stability studies: key to drilling at the technical limit and trouble cost reduction. *Society of Petroleum Engineers*, 2001, January 1, pp. 1–13. DOI: 10.2118/67763-MS
7. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G. Vliyanie dobychi nefi v uprugom rezhime na izmenenie NDS gornogo massiva. Ch. 1. Analiz instrumentalnykh nablyudeniy. Model deformirovaniya nefyanogo kolektora pod nagruzkoj [Influence of oil production in elastic mode on the change in the stress-strain state of a rock mass. P. 1. Analysis of instrumental observations. Model of deformation of an oil reservoir under stress]. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, 1998, no. 5, pp. 71–80.
8. Ovchinnikov V.P., Agzamov F.A., Aksenjva N.A., Anashkina A.E., Gerasimov D.S., Oganov A.S., Simonyants S.L. *Tekhnologiya bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Oil and gas well drilling technology]. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2017. Vol. 3, 342 p.
9. Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations. *Society of Petroleum Engineers*, 2001, June 1, pp. 1–6. DOI: 10.2118/56017-PA
10. Oganov S.A., Oganov G.S. *Tekhnologiya bureniya naklonno napravlennykh skvazhin s bolshim otkloneniyem zaboya ot vertikali* [The technology of extended reach drilling wells]. Moscow, VNIOENG Publ., 2008. 220 p.
11. Kuznetsov V.G., Kuvanaev R.M. Obzor sovremennykh metodov obespecheniya ustoychivosti stenok skvazhiny [Review of modern methods for ensuring the wellbore stability]. *Journal of Neftegaz.RU*. Available at: <https://neftegaz.ru/analisis/equipment/328580-obzor-sovremennykh-metodov-obespecheniya-ustoychivosti-stenok-skvazhiny> (accessed 09 November 2020).
12. Al Balushi F., Dahi Taleghani A. Numerical generation of stress-dependent permeability curves. *American Rock Mechanics Association*, 2020, September 18.
13. Boualam A., Rasouli V., Dalkhaa C., Djezzar S. Stress-dependent permeability and porosity in three forks carbonate reservoir, Williston Basin. *American Rock Mechanics Association*, 2020, September 18.
14. Li T., Drinkwater N., Whittlesey K., Condon P. Formation evaluation with NMR, resistivity and pressure data; a case study of a carbonate oilfield offshore West Africa. *Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts*, 2020, June 22.
15. Dzyublo A.D. *Neftegazonosnost i geologo-geofizicheskie modeli shelfa Rossiyskoy Arktiki i Dalnego Vostoka* [Oil and Gas Potential

- and Geological and Geophysical Models of the Shelf of the Russian Arctic and the Far East]. Moscow, Gubkin University Publ., 2018. 235 p.
16. Dzyublo A.D., Zonn M.S. Stroenie razrezov i neftegazonosnost vizeysko-nizhnepermnskogo neftegazonosnogo kompleksa Dolginskogo vala v akvatorii Pechorskogo morya [The structure of the sections and the oil and gas content of the Visean-Lower Permian oil and gas complex of the Dolginsky swell in the water area of the Pechora Sea]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2004, no. 9, pp. 18–23.
  17. Zakharov E.V., Reutskaya N.V. Osnovnye rezultaty kompleksnoy interpretatsii dannykh po poiskovym skvazhinam na vostochnom shelfe Pechorskogo morya [Main results of integrated interpretation of data on exploratory wells on the eastern shelf of the Pechora Sea]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2006, no. 5, pp. 2–8.
  18. Dzyublo A.D. Udelnaya poverkhnost porod-kollektorov v neftegazovoy geologii [Specific surface of reservoir rocks in oil and gas geology]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2006, no. 12, pp. 60–66.
  19. Dzyublo A.D., Toporkov V.G., Rudakovskaya S.Yu. Primenenie novykh tekhnologiy issledovaniya kerna skvazhin arkticheskogo shelfa [Application of new technologies for core analysis of Arctic shelf wells]. *«Gazflot» 10 let na arkticheskoy shelfe* [Gazflot – 10 years on the Arctic shelf]. Moscow, Gubkin University Publ., 2004. pp. 191–207.
  20. Behera Chaitanya. Integrated decision based planning with data centric approach: a novel way for successful delivering of a lean FDP for a complex carbonate reservoir, North Oman. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, November 2018. DOI: 10.2118/193204-MS
  21. Dzyublo A.D. *Geologo-geofizicheskie issledovaniya i modeli prirodnykh rezervuarov Barentsevo-Karskogo regiona s tselyu narashchivaniya resursnoy bazy uglevodorodov*. Dis. Dokt. nauk [Geological and geophysical studies and models of natural reservoirs in the Barents-Kara region in order to increase the resource base of hydrocarbons. Dr. Diss.]. Moscow, 2009. 267 p.
  22. Kovalenko Yu.F., Kulnich Yu.V., Karev V.I., Titorov M.Yu. *Otchet o provedenii ispytaniya desyati obraztsov kernovogo materiala iz skv. № 1 struktury Severo-Dolginskaya s tselyu otsenki vozmozhnosti sokhraneniya ili povysheniya pronitsaemosti v priskvazhinnoy oblasti v usloviyakh vtorichnogo vskrytiya produktivnykh obektov* [Test report on ten samples of core material from borehole no. 1 of the Severo-Dolginskaya structure in order to assess the possibility of maintaining or increasing permeability in the near-wellbore area under conditions of secondary penetration of productive objects]. Moscow, Research Center Geomechanics and Technology Publ., 1999. 55 p.
  23. Karev V.I. *Vliyaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornykh porod na filtratsionnyy protsess i debit skvazhin*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [The influence of the stress-strain state of rocks on the filtration process and well production rate. Dr. Diss. Abstract]. St-Petersburg, 2010. 33 p.
  24. Kovalenko Yu.F. *Geomekhanika neftyanykh i gazovykh skvazhin*. Dis. Dokt. nauk [Geomechanics of oil and gas wells. Dr. Diss.]. Moscow, 2012. 314 p.

Received: 22 September 2021.

#### Information about the authors

**Alexander D. Dzublo**, Dr. Sc., professor, Gubkin University.  
**Sergey O. Borozdin**, senior lecturer, Gubkin University.

УДК 626/627 626.86.004.67

## ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕ-ШИРВАНСКОГО КАНАЛА НА ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГО-МЕЛИОРАТИВНЫХ УСЛОВИЙ ШИРВАНСКОЙ СТЕПИ АЗЕРБАЙДЖАНА

Гюльмамедов Чингиз Джухангир оглы,  
gcin56@mail.ru

Азербайджанское научно-производственное объединение «Гидротехника и Мелиорация»,  
Азербайджанская республика, 1130, г. Баку, ул. И. Дадашова, 324.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью оценки изменений уровня, гидрохимического режима грунтовых вод и темпов засоления почвогрунтов в связи со строительством и эксплуатацией Верхне-Ширванского канала Азербайджана и выявление закономерности изменения гидрогеолого-мелиоративных условий территории в зоне влияния упомянутого канала в многолетнем разрезе.

**Цель:** изучение изменения гидрогеолого-мелиоративных условий территории под влиянием антропогенных факторов в зоне влияния Верхне-Ширванского канала после ввода его в эксплуатацию.

**Объекты:** зона влияния Верхне-Ширванского канала Ширванской степи Азербайджанской Республики.

**Методы.** На основании результатов проведённых автором исследований по изменению среднемноголетнего уровня, минерализации грунтовых вод и темпов засоления почвогрунтов, а также собранных данных по этому направлению в период с 1980 по 2018 гг. в зоне влияния Верхне-Ширванского канала Ширванской степи были составлены карты глубины залегания уровня и минерализации грунтовых вод. На основании анализа и систематизации фактических материалов по изменению гидрогеологических условий и засоленности почвогрунтов под влиянием антропогенных факторов проведено гидрогеолого-мелиоративное районирование территории.

**Результаты.** В связи с эксплуатацией Верхне-Ширванского канала в зоне его влияния изменился уровень, минерализация, химический состав грунтовых вод, засоленность и химический состав почвогрунтов. В период с 1958 по 2018 гг. уровень грунтовых вод территории в связи с проведением оросительной мелиорации поднялся более чем на 4 м, а их минерализация, за счёт инфильтрации поверхностных и отвода минерализованных вод посредством дренажа, уменьшилась на 16 г/л. По всей площади зоны влияния Верхне-Ширванского канала режим подземных вод формируется за счёт орошения земель и дренажа. На основании анализа результатов проведённых исследований по изменению уровня, химического состава подземных вод, засоленности почвогрунтов и собранных архивных материалов проведено гидрогеолого-мелиоративное районирование территории. Выделена одна провинция – Куринский синклиналий, одна зона с климатом умеренно-тёплых полупустынь и сухих степей с сухим летом, три района и четыре подрайона. Первый район охватывает привершинную часть конусов выноса речных артерий. Коэффициент фильтрации водовмещающих пород изменяется в пределах 4–10 м/сутки, минерализация грунтовых вод составляет 1–5 г/л, а глубина их залегания 6–10 м. Второй район охватывает среднюю часть конуса выносов речных отложений, коэффициент фильтрации пролювиальных отложений изменяется в пределах 3–5 м/сутки, минерализация грунтовых вод составляет 5–6 г/л, а глубина их залегания – 1,5–6,0 м. Третий район – это аллювиальная равнина реки Куры. Здесь коэффициент фильтрации водовмещающих пород достигает значений 1–10 м/сутки, минерализация грунтовых вод увеличивается до 1–50 г/л, а глубина их залегания составляет 1–3 м.

### Ключевые слова:

Влияние, канал, подземные воды, минерализация, химический состав, уровень грунтовых вод, засоление, мелиоративное районирование.

### Введение

Земельные и водные ресурсы Азербайджанской Республики – в ограниченном состоянии. Из 8,64 млн га территории 4,76 млн га (55,0 %) пригодны для сельского хозяйства, из них 1,68 млн га (39,4 %) занимают пашни, целина и пастбища. Территория для сельскохозяйственных выгонов составляет 2,57 млн га (54,1 % от пригодных земель). Поверхностные водные ресурсы Республики по среднемноголетним данным составляют 22–24 млн м<sup>3</sup>, более 70 % этого количества поступает из соседних республик в состоянии частичного загрязнения, а на долю ресурсов подземных вод приходится 9 млн м<sup>3</sup> [1–3].

С начала 1950 г. в Азербайджане начался этап интенсивного орошения земель. В 1952 г. было сдано в эксплуатацию Варваринское водохранилище, а в 1953 г. – уникальное, многоцелевое (энергетика, орошение, рыболовство, туризм, спорт) Мингечаурское водохранилище. Наряду со строительством Мингечаурского водохранилища для обеспечения земель

Кура-Араксинской степи поливной водой в 1955 г. был построен и сдан в эксплуатацию Верхне-Карабахский канал, в 1958 г. – Верхне-Ширванский канал (ВШК), а в 1960 г. – Главный Муганский канал и магистральный канал имени Сабира. В 1960 г. общая площадь орошаемых земель Республики составляла 950 тыс. га, а в настоящее время – 1428 тыс. га [2].

Под влиянием антропогенных факторов изменился химический состав, состояние и условия формирования, зоны питания, режим подземных вод территории [3, 4]. Изучение изменения состава и состояния подземных вод под влиянием антропогенных факторов и формирование гидрогеолого-мелиоративных условий территории на этом фоне является актуальной задачей перед современной гидрогеологией [5–12].

### Материалы и методика исследования

Территория Ширванской степи охватывает левый берег реки Куры от Мингечаурского водохранилища на северо-западе до Агджикабульского района на юго-востоке.

В границах степного ландшафта находятся территории Евлахского, Агдашского, Геокчайского, Исмаилинского, Уджарского, Зардобского, Кюрдамирского, Ахсуинского, Шемахинского и Агджикабульского административных районов.

В Ширванской степи 450 тыс. га площади пригодны для орошения, но из-за нехватки воды только на 225 тыс. га площади проводится орошение, из них 125,6 тыс. га (56 %) – за счёт ВШК [2–4].

ВШК берёт своё начало от Мингечаурского водохранилища. Назначение ВШК – обеспечивать орошаемой водой территорию Ширванской степи. В настоящее время канал ограничен р. Ахсучай, но в дальнейшем его планируется довести до г. Агджикабул. Проектная длина канала составляет 122,8 км, максимальный дебит достигает 78 м<sup>3</sup>/сек. Канал обеспечивает водой орошаемые площади на территориях Евлахского, Агдашского, Геокчайского, Уджарского, Кюрдамирского и Ахсуинского районов. Ширина по дну канала колеблется от 2,5 до 14,0 м, глубина – от 2,5 до 6,0 м. Большая часть канала имеет земляное русло. Бетонная или железобетонная облицовка вы-

полнена только в начальной части канала и на участках пересечения с речными артериями (всего 27 км). В связи с этим происходят большие потери воды из канала. За длительный период непрерывной эксплуатации, продолжающийся более 60 лет, канал утратил часть своих функций и потери воды из него увеличились, а коэффициент полезного действия (КПД) снизился. Среднегодовое количество потерь воды из канала составляет 324 млн м<sup>3</sup>/год [4, 6, 10]. С 2000 по 2016 гг. (за 17 лет) среднегодовое количество воды, поступившей из Мингечаурского водохранилища в русло канала составил 1229,0 млн м<sup>3</sup> (табл. 1), а на распределители подано 905,1 млн м<sup>3</sup> (табл. 2). За этот период КПД составил 74 % (905,1/1229,1=0,74), а среднегодовая потеря воды из ВШК достигла 324,0 млн м<sup>3</sup> (1229,1–905,1=324,0).

Все это доказывает, что каналу требуется реконструкция. Если после реконструкции КПД повысится до 0,95, то потеря воды из канала сократится до 61,5 млн м<sup>3</sup> (1229,1×0,95=61,5). Экономия воды составит 262,5 млн м<sup>3</sup> (324,0–61,5=262,5) что позволит дополнительно оросить 30,0 тыс. га земель.

**Таблица 1.** Объёмы (млн м<sup>3</sup>) и расходы (м<sup>3</sup>/с) воды, поступившей из Мингечаурского водохранилища за период с 2000 по 2016 гг. в русло Верхне-Ширванского канала [4, 6]

**Table 1.** Volumes (million m<sup>3</sup>) and flow rates (m<sup>3</sup>/s) of water taken from the Mingechevir reservoir for 2000–2016 with Verkhne-Shirvan canal [4, 6]

Год Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Среднее Average
м <sup>3</sup> /с m <sup>3</sup> /s	32,83	35,00	37,00	37,83	43,50	48,92	46,08	46,17	37,50	33,83	36,25	35,00	38,67	36,67	41,83	39,00	35,91	38,94
млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	1038,0	1104,0	1167,1	1193,4	1376,0	1543,0	1453,0	1456,0	1186,0	1067,2	1143,4	1104,0	1223,0	1156,0	1319,0	1230,2	1135,0	1229,0

**Таблица 2.** Объёмы (млн м<sup>3</sup>) и расходы (м<sup>3</sup>/с) воды, поданной на орошение Верхне-Ширванским каналом за 2000–2016 гг. [4, 6]

**Table 2.** Volumes (million m<sup>3</sup>) and flow rates (m<sup>3</sup>/s) of water supplied for irrigation from the Verkhne-Shirvan canal for 2000–2016 [4, 6]

Год Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Среднее Average
м <sup>3</sup> /с m <sup>3</sup> /s	23,22	25,23	27,24	27,00	34,10	35,92	34,93	32,42	24,98	25,66	24,47	24,98	28,43	29,20	31,23	30,08	28,44	28,68
млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	734,3	795,6	859,2	851,4	1078,4	1132,6	1102,4	1022,3	790,10	890,3	771,6	787,8	899,2	920,8	984,9	948,7	899,4	905,11

**Таблица 3.** КПД и водные потери в ирригационных системах Республики в различные годы [4, 10]

**Table 3.** Efficiency and water losses in the irrigation systems of the Republic in different years [4, 10]

Год Year	Орошаемая площадь, тыс. га Irrigated area, thousand ha	КПД системы System efficiency	Фильтрационные потери, км <sup>3</sup> Filtration losses km <sup>3</sup>
1915	535	0,38	1,3
1930	550	0,45	1,5
1940	726	0,53	1,7
1950	810	0,60	2,1
1960	950	0,60	2,5
1970	1024	0,64	2,8
1980	1207	0,65	3,5
1985	1263	0,66	6,0
1990	1410	0,68	5,9
1995	1453	0,73	5,5
2000	1426	0,78	4,4
2005	1426	0,80	4,3
2010	1426	0,82	4,3
2018	1426	0,85	4,2

Результаты исследований, проведённых в 1960–2018 гг. ОАО «Мелиорация и водное хозяйство Азербайджана» и Научно-производственным объединением гидротехники и мелиорации Азербайджана, показывают, что поступающая из Мингечаурского водохранилища, при транспортировке по руслу ВШК часть воды фильтруется в почвогрунт (табл. 3), а часть испаряется. Испарение с водной поверхности на один км протяженности канала рассчитывается по формуле:

$$E=0,011x_e \cdot (b+2mh), \text{ м}^3/\text{с на 1 км},$$

где E – испарение с водной поверхности, м<sup>3</sup>/с; x<sub>e</sub> – верхняя ширина уреза канала, м; b – ширина дна канала, м; h – мощность воды в канале, м; m – коэффициент откоса канала; (b+2mh) – ширина канала по верху, м.

Фильтрационные воды поступают в грунтовые минерализованные воды и поднимают их уровень, в связи с чем повышается испарение с поверхности грунтовых вод (ГВ). В результате происходит вто-

ричное засоление почвы, уменьшается влажность почвы, снижается плодородие сельскохозяйственных культур, нарушается экологическое равновесие, повышаются материальные расходы на реконструкцию и рекультивацию земель.

После реконструкции канала в ближайшие годы по проектам института «Азгипроводхоз» Азербайджана для полного обеспечения территории водой и освоения ещё 45952 га земель Шемахинского и Агджабульского районов (табл. 4) канал будет продолжен до 67,72 км, итого длина будет составлять 190 км, а расход 180 м<sup>3</sup>/с. По этому проекту для уменьшения потерь из канала предусматривается снабдить откосы канала геомембранным железобе-

тонным покрытием. В этом случае фильтрационные потери будут составлять 1,5–2,0 %, потери на испарение – 1,5 %, технические потери – 1,0–1,5 %.

Для уменьшения и предотвращения фильтрационных потерь из ирригационных каналов можно провести следующие мероприятия: добиться более эффективного использования водных ресурсов, повысить КПД каналов, внедрить систему управления для сохранения уровня грунтовых вод (УГВ), что в результате приведёт к предотвращению повторного засоления и улучшению мелиоративного состояния почвогрунтов, повышению урожайности сельскохозяйственных культур, сохранению экологической стабильности и защите окружающей среды [2, 6, 10].

**Таблица 4.** Орошаемые площади по административным районам до и после реконструкции Верхне-Ширванского канала в зоне его влияния [2]

**Table 4.** Irrigated areas by administrative districts before and after the reconstruction of the Verkhne-Shirvan canal in the zone of its influence [2]

Районы Areas	Орошаемые Верхне-Ширванским каналом площади Areas irrigated with the Verkhne-Shirvan canal		В том числе/Including			
			площади, орошаемые Верхне-Ширванским каналом в настоящее время areas currently irrigated with the Verkhne-Shirvan canal		новые площади, орошаемые Верхне-Ширванским каналом new areas irrigated with the Verkhne-Shirvan canal	
	Брутто Gross	Нетто Net	Брутто Gross	Нетто Net	Брутто Gross	Нетто Net
Евлахский Evlakh	10834	9751	7692	6923	3142	2828
Агдашский Agdash	14529	13076	8893	8004	5636	5072
Геокчайский Geokchay	23546	21191	16036	14432	7510	6759
Исмаиллинский Ismayilli	2497	2247	2497	2247	–	–
Уджарский Ujar	34644	31179	26658	23902	7986	7187
Зардобский Zardob	8263	7437	8263	7437	–	–
Кюрдамирский Kurdamir	69544	62590	37072	33365	32472	29225
Ахсуинский Akhsu	41748	37619	26774	24097	15024	13522
Агджабульский Agdjigabul	33482	30134	2158	1942	31324	28192
Шемахинский Shemakhi	18090	16281	3462	3116	14628	13165
Итого/Total	257227	231505	139505	125555	117722	105950

Многолетние наблюдения показывают, что если проектные максимальные расходы канала составляли 78 м<sup>3</sup>/с, а среднеголетние – 35,4, то после реконструкции предусматривается повысить максимальный расход канала до 180 м<sup>3</sup>/с, тогда среднегодовой расход будет 91 м<sup>3</sup>/с. За год расход составит:

$$91 \text{ м}^3/\text{с} \cdot 86400 \text{ с} \cdot 365 \text{ суток} = 2870 \text{ млн м}^3.$$

Территория зоны влияния ВШК считается сухой предгорной зоной, здесь только 12 % площади можно отнести к участкам с достаточной степенью естественной дренированности, а остальная часть является слабо дренированной или не дренированной. Литологический состав геологического разреза представлен тяжелыми глинами, характерными для Ширванской степи [6, 7]. По водопроницаемости почвы территория разделяется на три группы: почвы с ко-

эффициентом фильтрации больше 0,30 м/сутки; слабо водопроницаемые почвы с коэффициентом фильтрации – 0,05–0,30 м/сутки; почвы с коэффициентом фильтрации меньше 0,05 м/сутки [7, 8]. Величина гумуса 0,50–2,07 %, карбонатность 11–17 %, pH 8,2–8,8. Общая площадь орошаемых земель составляет 230,18 тыс. га (табл. 4), из них 153,3 тыс. га, или 66,6 % (112,8 закрытые, 40,5 открытые), площади снабжены коллекторно-дренажной сетью (КДС). Состояние оросительных каналов и КДС открытого типа и находятся в земляном русле. С 1971 по 1991 гг. отдельные части канала покрывались бетонной облицовкой.

Дренированные территории обслуживают три магистральных коллектора общей длиной 308 км (Верхне-Ширванский коллектор, Нижне-Ширванский коллектор-1, Нижне-Ширванский коллектор-2) при дренажном модуле 0,10–0,25 л/с га.

За год в зону влияния ВШК подаётся 1,41 км<sup>3</sup> воды, а с территории отводится 0,298 км<sup>3</sup> воды. По данным инвентаризации, проведённой нами в разное время, можно сказать, что техническое состояние КДС неудовлетворительное. Минерализация воды, поданной ВШК на орошаемые территории, изменяется в пределах 0,4–1,2 г/л (в среднем 0,67 г/л), а минерализация воды Верхне-Ширванского коллектора составляет 2,5–7,3 г/л (в среднем 3,59 г/л) (табл. 5).

**Таблица 5.** Расходы и минерализация воды, поступающей по ВШК и отводящейся по Главному Ширванскому коллектору с территории Ширванской степи [3, 10, 12]

**Table 5.** Discharge of water and its mineralization entering along the Verkhne-Shirvan canal and discharging from the Main Shirvan collectors from the territory of the Shirvan steppe [3, 10, 12]

Верхне-Ширванский канал Verkhne-Shirvan canal	Среднегодовая минерализация, г/л Average annual mineralization, g/l	0,675
	Расход воды, м <sup>3</sup> /с Water consumption, m <sup>3</sup> /s	45,050
	Объём воды поступающий на территорию, км <sup>3</sup> Volume of water entering the territory, km <sup>3</sup>	1,410
Главный Ширванский коллектор Main Shirvan collector	Среднегодовая минерализация, г/л Average annual mineralization, g/l	3,588
	Расход воды, м <sup>3</sup> /с Water consumption, m <sup>3</sup> /s	10,100
	Объём воды, отводящийся с территории, км <sup>3</sup> Volume of water discharged from the territory, km <sup>3</sup>	0,298
Водоотвод с зоны влияния Верхне Ширванского канала, % Drainage from the zone of influence of the Verkhne-Shirvan canal, %		0,211
Мелиоративный индекс в зоне влияния Верхне-Ширванского канала Reclamation index in the zone of influence of the Verkhne-Shirvan canal		5,28

На основании результатов исследований, проведённых автором в 1980–2018 гг., по измерению уровня грунтовых вод в наблюдательных скважинах и анализов материалов «Национальной Геолого-Разведочной Службы» Министерства экологии и природных ресурсов Азербайджанской Республики по прогнозированию уровня режима грунтовых вод установлено, что на тех участках, где уровень грунтовых вод залегает глубже 10 м, за счёт фильтрации на орошаемых площадях и фильтрационных потерь из каналов через 3–7 лет ГВ будут подниматься до поверхности земли и в результате может произойти вторичное засоление почвы.

Современное состояние почвы определяется по степени засоления, количеству токсичных солей и типу засоления. Степень засоления по плотному остатку изменяется от 0,1 до 3,0 и более %. Допустимая степень засоления зависит от типа засоленности почв. Допустимый предел засоления для всех типов менее 0,3 % по плотному остатку. Токсичность солей зависит от их типа. Самой токсичной солью является NaHCO<sub>3</sub> (сода), нетоксичной солью – CaSO<sub>4</sub>. Тип засоления бывает: Cl–SO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>–Cl, HCO<sub>3</sub>, содовые [2, 10, 12–16].

## Результаты исследования

Изучением гидрогеологических условий Ширванской степи занимались Ф.Ш. Алиев, Ф.П. Саваренский, В.А. Приклонский, И.Й. Давыдов, Г.Ю. Исрафилов, Е.Р. Фиалко, В.А. Листенгартен, А.К. Алимов, А.А. Мусаев, Н.В. Роговская, З.А. Абдуллаев, С.М. Эфендиева, Д.Ю. Исрафилов, А.Б. Алекперов, Ч.Д. Гюльмамедов и др.

В 1950 г. гидрогеологические и ирригационно-мелиоративные работы в Азербайджане были еще слабо развиты. В то время в Ширванской степи глубина залегания УГВ составляла 5–10 м [1, 10, 12] и на больших глубинах подземные воды были отнесены к типу гидрокарбонатно-натриевых, а ближе к поверхности земли их анионный состав изменялся на хлоридно-сульфатный и сульфатно-хлоридный [1, 12, 14, 17–22]. При минерализации воды до 1 г/л из анионов ведущую роль играют гидрокарбонаты, а из катионов – натрий и кальций, в редких случаях – магний [6, 15, 16]. В составе грунтовых вод при минерализации 10–15 г/л концентрация гидрокарбонатов уменьшается, а хлор-иона и сульфат-иона увеличивается. В этих водах концентрация натрия и магния больше, чем калия. В грунтовых водах при минерализации 50–100 г/л и более уменьшается содержание иона сульфата, увеличивается концентрация хлора, а иногда наоборот [3, 18]. На исследуемой территории в связи с проведением ирригационных мероприятий изменился многолетний и сезонный уровень и гидрохимический режим ГВ. Этот процесс продолжается до настоящего времени.

Под влиянием антропогенных факторов в течение 60 лет УГВ поднялся более чем на 4,0 м. В 1962 г. на большую часть площади Ширванской степи (около 84,0 %) подземные воды залегали на глубине 0–5,0 м, а в 1970–1980 гг. площадь территорий с глубиной залегания подземных вод 0–3,0 м увеличилась до 90 %. Поднятие УГВ продолжалось до 1995 г. с различной интенсивностью в связи с отсутствием или плохой работой КДС, что сопровождалось продолжением процесса засоления почвогрунтов. В последующие годы в связи со строительством КДС и интенсификацией процессов испарения с поверхности ГВ, расположенных ближе к поверхности земли, глубины залегания уровня подземных вод постепенно стабилизировались (табл. 6).

Расширение орошаемых площадей и увеличение водоподдачи на массивах орошения приводит в некоторых случаях к ухудшению мелиоративного состояния земель. Это заставляет со всей серьёзностью заняться вопросом прогнозирования режима ГВ этих земель.

Соответственно режиму УГВ формируется и их минерализация [3, 9, 11, 18–22]. В течение 60 лет минерализация ГВ уменьшилась примерно на 16,0 г/л. В 1950–1960 гг. минерализация ГВ изменилась в пределах от 1,0 до 150 г/л. Начиная с 1960 г. в связи с антропогенными факторами началось постепенное уменьшение минерализации ГВ. В период с 2000 по 2018 гг. она уменьшилась до 15,0–16,0 г/л (табл. 7). Понижение минерализации связано не только с инфильтрацией орошаемых вод [1, 6, 18, 20],

но также с функционированием на территории КДС. Для отвода коллекторно-дренажных вод с 143,3 тыс. га площади в 1965 г. был построен и сдан в эксплуатацию Главный Ширванский коллектор с проектным расходом 44 м<sup>3</sup>/с, а в 1984–1987 гг. коллектор был реконструирован, и его водопропускная способность повысилась до 72,0 м<sup>3</sup>/с.

**Таблица 6.** Распределение площадей Ширванской степи по глубине залегания грунтовых вод в различные годы, в % от общей площади [10]

**Table 6.** Distribution of the Shirvan steppe by groundwater depth, % of the total area at different times [10]

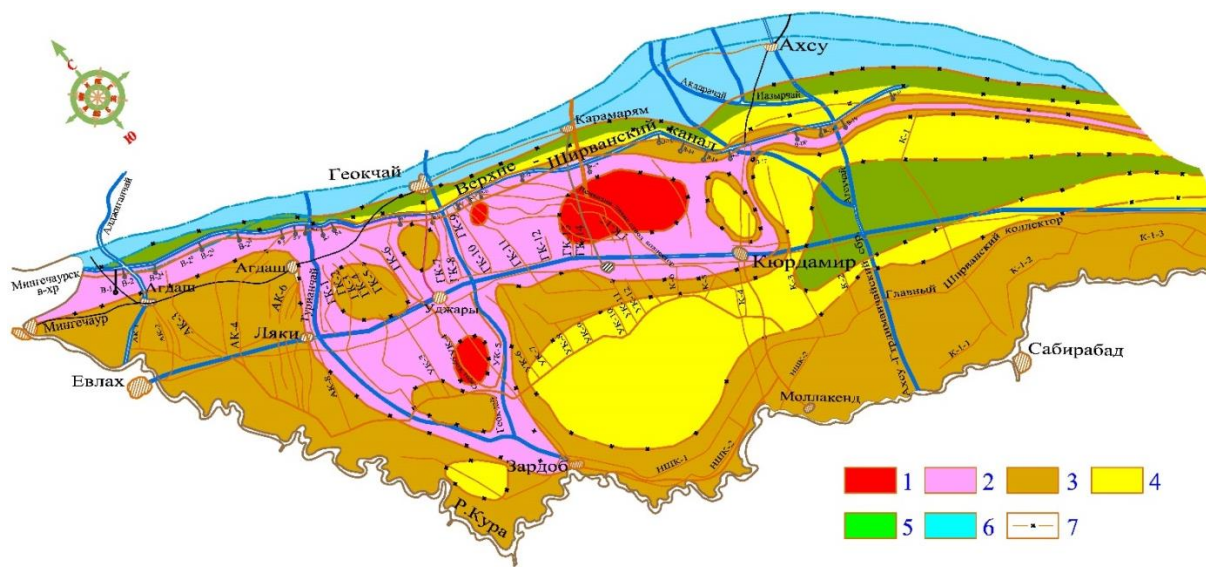
Год Year	Глубина залегания уровня грунтовых вод, м Depth of groundwater level, m						Осреднённое значение глубины залегания уровня грунтовых вод, м Average value of the groundwater level depth, m
	<1,0	1,0–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5–3,0	>3,0	
1930	4,4	2,7	3,1	10,2	25,9	63,7	6,04
1950	5,6	3,0	3,5	11,5	26,2	50,2	5,78
1970	16,2	15,1	16,0	23,3	15,1	13,3	2,43
1980	27,2	17,1	15,0	26,3	8,3	6,2	2,29
1990	21,8	21,1	18,5	29,2	6,3	3,1	2,04
2010	20,5	20,8	19,7	28,2	7,3	2,5	1,80
2018	15,1	22,1	23,8	29,4	6,8	2,8	1,82

**Таблица 7.** Минерализация грунтовых вод Ширванской степи на середину мая [6, 10]

**Table 7.** Mineralization of groundwater in the Shirvan steppe in mid-May [6, 10]

Год Year	Распределение площадей (в % от расчётной) по градациям минерализации грунтовых вод (г/л) Distribution of areas (in % of the calculated) by gradations of groundwater salinity (g/l)							Средневзвешенное значение минерализации грунтовых вод, м Weighted average value of groundwater salinity, m
	<1	1–3	3–5	5–10	10–25	25–50	>50	
1930	6,2	8,7	13,0	15,1	15,2	16,0	26,8	28,4
1950	4,3	6,2	9,6	14,7	17,1	18,3	29,7	31,7
1960	2,0	4,2	6,5	16,1	18,3	20,2	32,7	34,4
1970	3,9	5,2	7,2	15,6	17,7	19,4	31,9	33,5
1980	9,7	15,5	15,0	17,1	13,8	10,9	19,0	21,4
1990	13,3	16,4	17,2	18,4	13,4	7,1	14,5	17,1
2000	14,8	28,5	16,6	17,7	11,6	6,9	10,3	14,9
2010	12,3	30,4	18,6	17,5	10,3	4,3	6,6	15,2
2018	9,1	29,6	21,1	20,3	10,2	3,5	6,2	15,5

По нашим расчётам [3, 10] с 1963 г. по настоящее время с территории равнины дренажными водами ежегодно выносятся более 3,2 млн т солей, что приводит к сокращению площади с высокой минерализацией грунтовых вод.



**Рис. 1.** Схематическая карта глубин залегания уровня грунтовых вод Ширванской степи (по состоянию на 20.05.2018 г., составлена Ч.Д. Гюльмамедовым; М. 1:100000): уровень грунтовых вод, м: 1) <1,0; 2) 1,0–1,5; 3) 1,5–2,0; 4) 2,0–2,5; 5) 2,5–3,0; 6) >3,0; 7) границы участков с различными глубинами залегания уровня грунтовых вод

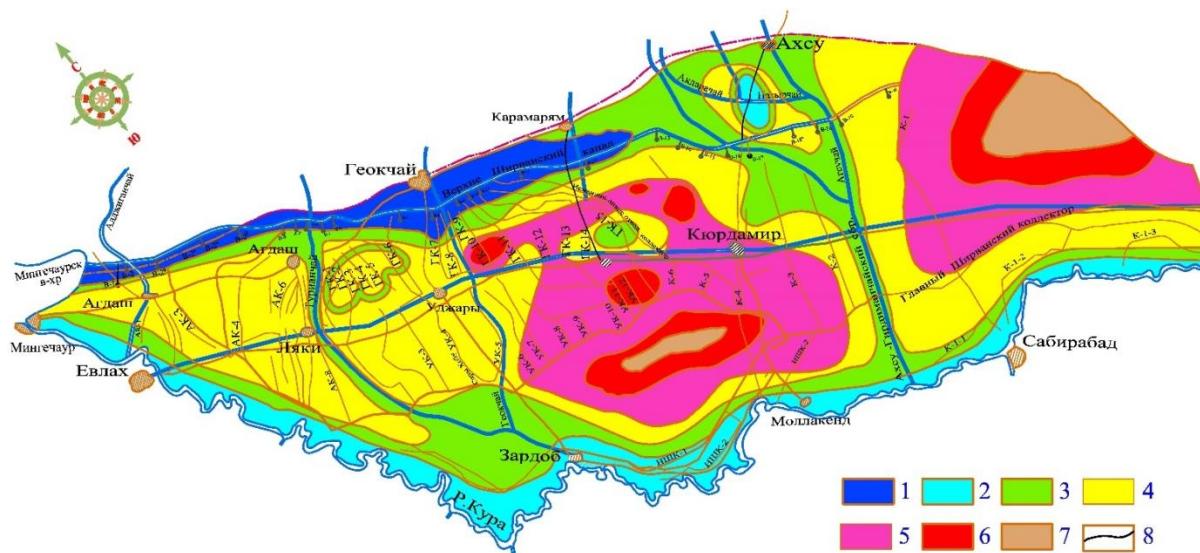
**Fig. 1.** Schematic map of the groundwater level depth of the Shirvan steppe (as of 20.05.2018, composed by Ch.D. Gulmammadov; S. 1:100000): groundwater level, m: 1) <1,0; 2) 1,0–1,5; 3) 1,5–2,0; 4) 2,0–2,5; 5) 2,5–3,0; 6) >3,0; 7) boundaries of sites with different depths of groundwater occurrence

#### Гидрогеолого-мелиоративное районирование

Для научного обоснования проектирования ирригационно-мелиоративных мероприятий широко используется гидрогеолого-мелиоративное районирование, которым занимались многие исследователи [6, 10, 12, 17, 19, 20, 23, 24]. При рассмотрении работ различных исследователей по вопросам методики гидро-

геолого-мелиоративного районирования выявляется картина определенной эволюции мелиоративного анализа, намечаются различные подходы к разрешению проблемы в целом. Первый из них характеризуется стремлением организовать учёт земельных фондов, в том числе земель вторичного засоления, и составить кадастры орошаемых земель.





**Рис. 2.** Схематическая карта общей минерализации грунтовых вод Ширванской степи (по состоянию на 20.05.2018 г., составлена Ч.Д. Гюльмамедовым; М. 1:100000): минерализация грунтовых вод, г/л: 1) >1; 2) 1–3; 3) 3–5; 4) 5–10; 5) 10–25; 6) 25–50; 7) >50; 8) границы между участками с разной минерализацией грунтовых вод

**Fig. 2.** Schematic map of the general mineralization of groundwater in the Shirvan steppe (as of 20.05.2018, composed by Ch.D. Gulmammadov; S. 1:100000): mineralization of groundwater, g/l: 1) >1; 2) 1–3; 3) 3–5; 4) 5–10; 5) 10–25; 6) 25–50; 7) >50; 8) boundaries between areas with different groundwater salinity

Второй подход – выяснение причин засоления почв при орошении, что служит основой для разработки системы мелиоративных мероприятий. На данном этапе разработаны принципы районирования орошаемых территорий в зависимости от физико-географических условий. Третий подход характеризуется стремлением классифицировать орошаемые территории с точки зрения условий строительства ирригационных систем.

На основании результатов проведённых автором исследований и анализа данных бывшего Азгеологуправления (ныне «Национальные Геолого-Разведочные Службы» Министерства экологии и природных ресурсов Азербайджанской Республики) и Гидрогеолого-мелиоративной экспедиции (ныне «Гидрогеолого-мелиоративной службы» при ОАО «Мелиорация и водное хозяйство») проведено гидрогеолого-мелиоративное районирование и рассчитаны площади распространения каждого района.

Нами при выделении таксономических единиц гидрогеолого-мелиоративного районирования в качестве основы принята классификация Д.М. Каца [24]. При этом выделена провинция – по признакам отнесения к определённой геолого-тектонической структуре; зона – по почвенно-климатическим признакам; районы – по геоморфологическим элементам и литологическому строению толщи до водоупора; подрайоны – по типу, степени засоленности почвогрунтов и режиму грунтовых вод.

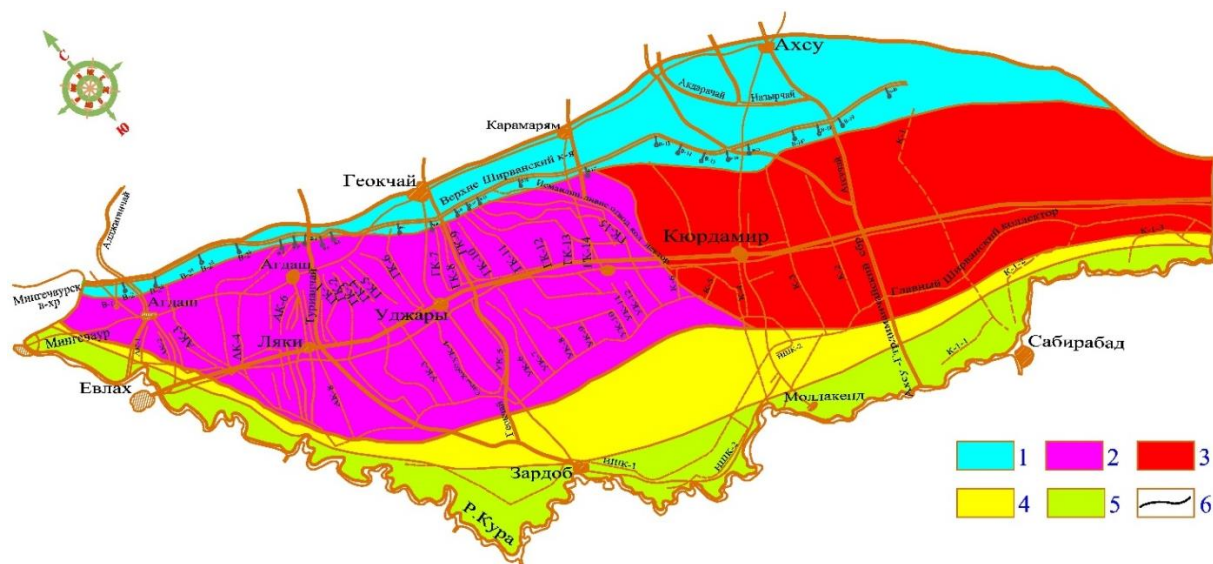
Оценка гидрогеологических условий применительно к обоснованию мелиоративного строительства связана с детализацией существующего гидрогеологического районирования. За основной показатель нами принимается структура водно-солевого баланса. Выделяется одна провинция – Куринский синклино-

рий, одна зона с климатом умеренно-тёплых полупустынь и сухих степей с сухим летом, три района, четыре подрайона (табл. 8).

**Таблица 8.** Основные показатели гидрогеолого-мелиоративных районов и подрайонов

**Table 8.** Main indicators of hydrogeological reclamation areas and subareas

Районы/Areas	Подрайоны/Subareas	Основные осреднённые характеристики за 1950–2018 гг. Main averaged characteristics for 1950–2018			
		Процент от общей площади, % Percentage of total area, %	Уровень грунтовых вод в числителе, напорных вод в знаменателе, м Groundwater level in the numerator, pressure water in the denominator, m	Минерализация грунтовых вод в числителе, напорных вод в знаменателе, г/л Mineralization of groundwater in the numerator, pressure water in the denominator, g/l	Тип режима грунтовых вод Groundwater regime type
I	–	20,0	5,0–10,0/4,6–9,6	1,0–5,0/0,5–1,0	Ирригационный Irrigation
	A	28,0	1,5–3,0/0,8–1,5	5,0–20,0/1,0–5,0	Мелиоративный Meliorative
II	Б	24,0	2,0–6,0/1,5–4,2	20,0–80,0/1,0–10,0	Ирригационно-поливной Irrigation-watering
	A	15,0	1,0–5,0/1,0–3,0	40,0–50,0/3,0–15,0	Климатический Climatic
III	Б	13,0	2,0–4,0/0,6–2,9	1,0–40,0/1,0–20,0	Гидрологический Hydrological



**Рис. 3.** Схематическая карта гидрогеолого-мелиоративного районирования Ширванской степи (по состоянию на май 2018 г., составлена Ч.Д. Гюльмамедовым; М. 1:100000): районы (I, II, III) и подрайоны (А, Б). 1) I; 2) II А; 3) II Б; 4) III А; 5) III Б; 6 – границы гидрогеолого-мелиоративных районов и подрайонов

**Fig. 3.** Schematic map of hydrogeological-reclamation zoning of the Shirvan steppe (as of May 2018, compiled by Ch.D. Gulmamedov; S. 1:100000): districts (I, II, III) and subdistricts (A, B). 1) I; 2) II A; 3) II B; 4) III A; 5) III B; 6) boundaries of hydrogeological-reclamation regions and subregions

Зона влияния, прилегающая к трассе ВШК, рассматривается как область, характеризующаяся наличием в подавляющей части её территорий разгрузки напорных подземных вод, подпитывающих грунтовые воды. Это определяет общность структуры водно-солевого баланса по всей территории.

*Первый район* охватывает привершинную часть конусов выноса речных артерий и развита на 20,0 % от общей площади. Здесь напорное питание ослаблено за счёт дренирующей роли речных долин, происходит формирование подземных вод и их расчленение на напорные и ГВ. Подземный отток, направленный с предгорных зон к реке Куре, наибольший, практически он не оказывает никакого влияния на грунтовые воды и процессы почвообразования. В районе за счёт местных факторов поверхностного увлажнения формируется слабоминерализованные грунтовые воды, дренируемые долинами рек. Первый от поверхности выдержанный водоупор залегает на глубине более 25 м [6, 7, 18]. Водовмещающие породы обладают высокими фильтрационными свойствами с коэффициентом фильтрации 4–10 м/сутки. Минерализация грунтовых вод составляет 1–5 г/л, глубина их залегания 5–10 м. Здесь распространён ирригационный тип режима ГВ. Почвогрунты незасолённые. Возможно дальнейшее освоение района под орошение без сложных гидротехнических мелиораций.

*Второй район* охватывает среднюю часть конуса выносов речных отложений, где распространены пролювиальные отложения с коэффициентом фильтрации 3–5 м/сутки. Грунтовые воды с минерализацией 5–80 г/л залегают на глубине 1–6 м. Величина напорного питания составляет 3–4 тыс. м<sup>3</sup>/га. Глубина залегания кровли водоупорной толщи находится в 20–25 м от поверхности земли. Здесь происходит транспорти-

ровка грунтовых вод, что оказывает активное влияние на почвообразование. В западной части территории естественный режим засоления нарушается интенсивным орошением и дренажом, а в восточной части – ирригацией и орошением. После реконструкции дренажных сетей для регулирования засоления в западной части требуется в основном эксплуатационные мероприятия, на востоке – строительство новых дренажных сетей на фоне последующих промывок и орошения. Второй район охватывает 55,0 % от общей площади.

*Третий район* – это аллювиальная равнина реки Куры, которая развита на 25,0 % площади. Напорное питание изменяется в пределах 1–3 тыс. м<sup>3</sup>/га в год. Коэффициент фильтрации водовмещающих пород 1–10 м/сутки. Минерализация грунтовых вод изменяется в пределах 1–50 г/л. Грунтовые воды залегают на глубинах 1–5 м, оказывая активное отрицательное влияние на процессы почвообразования. Общее мелиоративное состояние земель неблагоприятное. Для развития орошения требуется организация промывного режима этих земель и промывок на фоне интенсивного дренажа.

На основе характеристики районов можно предложить те или иные мелиоративные мероприятия в связи с развитием орошения [12, 17, 23, 25]. Для этого необходимо провести режимные наблюдения и получить более конкретные данные. Внутри районов выделяются характерные подрайоны. Подрайоны выделены по закономерности изменения водно-солевого баланса территории в многолетнем разрезе. Основанием для этого послужили характеристики прироста уровня и увеличения минерализации грунтовых вод, т. е. конкретные параметры, отражающие воздействие результирующего водно-солевого баланса. Перечисленные характеристики позволяют обосновать для

каждого района и подрайона конкретный состав мелиоративных мероприятий по регулированию водно-солевого баланса в связи с развитием орошения.

#### Заключение

В течение 60 лет уровень грунтовых вод на территории поднялся более чем на 4,0 м, а их минерализация уменьшилась на 16,0 г/л. Режим подземных вод в основном формируется за счёт орошения земель и дренажа.

При проведении гидрогеолого-мелиоративного районирования провинция выделена по признакам отнесения к определенной геолого-тектонической структуре; зона – по почвенно-климатическим признакам; районы – по геоморфологическим элементам и литологическому строению толщи до водоупора; подрайоны – по типу и степени засоленности почвогрунтов и режиму грунтовых вод. Выделяется одна провинция – Куринский синклиорий, одна зона с климатом умеренно-тёплых полупустынь и сухих степей с сухим летом, три района и четыре подрайона.

Первый район охватывает привершинную часть конусов выноса речных артерий, коэффициент фильтрации водовмещающих пород 4–10 м/сутки, минерализация грунтовых вод 1–5 г/л, а глубина их залегания 6–10 м. Глубина залегания кровли водоупорной толщи более 25,0 м от поверхности земли. Здесь рас-

пространён ирригационный тип режима грунтовых вод. Почвогрунты незасоленные. Возможно дальнейшее освоение района с орошением без сложных гидротехнических мелиораций.

Второй район охватывает среднюю часть конуса выносов речных отложений с коэффициентом фильтрации водовмещающих пород 3–5 м/сутки, минерализацией грунтовых вод 5–60 г/л, глубиной залегания 1,5–6,0 м. Напорное питание 3–4 тыс. м<sup>3</sup>/га. Глубина залегания кровли водоупорной толщи 20,0–25,0 м от поверхности земли. После реконструкции дренажных сетей для регулирования засоления в западной части требуются в основном эксплуатационные мероприятия, на востоке – строительство новых дренажных сетей на фоне последующих промывок и орошения.

Третий район – это аллювиальная равнина реки Куры, напорное питание изменяется в пределах 1–3 тыс. м<sup>3</sup>/га в год при практически отсутствующем подземном оттоке. Первый от поверхности выдержанный водоупор залегает на глубинах 17–20 м, коэффициент фильтрации водовмещающей породы 1–10 м/сутки. Минерализация грунтовых вод пёстрая, изменяется в пределах 1–50 г/л. Грунтовые воды залегают на глубинах 1–3 м. Для развития орошения требуется организация его промывного режима и промывок на фоне интенсивного дренажа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алиев Ф.Ш. Подземные воды Азербайджанской республики, использование запасов и геологические проблемы. – Баку: Чашыоглы, 2000. – 325 с.
- Ахмедзаде А.Д., Гашимов А.Д. Кадастр мелиоративных и водохозяйственных систем. – Баку: Азернешр, 2006. – 626 с.
- Гюльмамедов Ч.Д., Джафарлы Ж.В. Режим подземных вод Ширванской степи Азербайджанской республики // Международный журнал «Наука и мир». – 2019. – № 1 (65). – С. 22–26.
- «Оценка гидрогеолого-мелиоративного условия земель, расположенных в зоне влияния ВШК, и разработка научно обоснованных мероприятий для их улучшения» / Г.А. Хасаев, Д.М. Исмаилов, М.Я. Асадов, П.А. Абдуллаев, Ш.Д. Данялов, Г.М. Магеррамов, А.Г. Рагимова // Годовой отчёт Научно-производственного объединения «Гидротехника и Мелиорация» Азербайджана. – Баку, 2019. – 65 с.
- Куренной В.В., Шпак А.А. Мониторинг геологической среды – основа экологической оценки техногенных изменений геологической среды // Разведка и охрана недр. – 1999. – № 12. – С. 46–49.
- Гюльмамедов Ч.Д. Взаимосвязи поверхностных и подземных вод Ширванской степи Азербайджана // Международный журнал «Наука и мир». – 2018. – № 10 (62). – С. 14–20.
- Геология Азербайджана. Т. VIII. Гидрогеология и инженерная геология / под ред. А. Б. Алекперова. – Баку: Из-во «Nafta-Press», 2008. – 368 с.
- Листенгартен В.А. Формирование ресурсов подземных вод аллювиально-пролювиальных равнин. – Баку: Изд-во «Элм», 1987. – 164 с.
- Jackson J., Priestley K., Allen M. Active tectonics of the South Caspian Basin // Geophysical Journal International. – 2002. – V. 148. – Iss. 2. – P. 214–245.
- Гюльмамедов Ч.Д. Влияние техногенной деятельности человека на гидрогеологические условия // Международный журнал «Наука и мир». – 2020. – № 2 (78). – С. 15–19.
- Куренной В.В., Куренная Л.М., Соколовский Л.Г. Общее гидрогеологическое районирование. Концепции и реализации // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 9. – С. 42–48.
- Алимов А.К. Гидрогеологические процессы и количественные оценки источников формирования элементов водно-солевого баланса грунтовых вод для обоснования гидрогеолого-мелиоративных прогнозов. – Баку: Элм, 2001. – 294 с.
- Barthel R.A. Call for more fundamental science in regional hydrogeology // Hydrogeology Journal. – 2014. – V. 22. – № 3. – P. 507–510.
- Montcoudiol N., Molson J., Lemieux J.-M. Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Quebec, Canada): a regional-scale study // Hydrogeology Journal. – 2014. – V. 23. – № 2. – P. 377–396.
- Wang J., Zuo R., Caers J. Dickovering geochemical patterns by faktor-based cluster analysis // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – V. 181. – P. 106–115.
- Groundwater geochemistry and microbial community structure in the aquifer transition from volcanic to alluvial areas / S. Amalfitano, A.D. Bon, A. Zoppini, S. Ghergo, S. Fazi, D. Parrone, P. Casella, F. Stano, E. Preziosi // Water Resources. – 2014. – V. 65. – P. 384–394.
- Burnett W.C. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods // Science of the Total Environment. – 2006. – P. 498–543.
- Исрафилов Ю.Г. Научно-технические основы регулирования подземного стока на конусах выноса // Современные проблемы рационального и комплексного использования водных ресурсов: Труды АзНИИ Водных проблем. – Баку: 2000. – С. 83–85.
- Geochemical and magnetic properties of sediments as pollution indicators. Case study: Suquia river, Córdoba, Argentina / L.D. Sepúlveda, K.L. Lecomte, A.I. Pasquini, E.G. Mansilla, M.A.E. Chaparro // Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. – 2019. – V. 36. – P. 183–194.
- Исрафилов Ю.Г. Формирование, прогноз и рациональное использование ресурсов пресных подземных вод предгорных равнин Азербайджанской Республики: автореф. дис. ... д-ра наук. – Баку, 2005. – 48 с.
- Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gornyi Altai) // Geography and Natural Resources. – 2013. – V. 34. – № 4. – P. 364–370.

22. Geochemical distribution of major and trace elements in agricultural soils of Castilla La Mancha (central Spain): finding criteria for baselines and delimiting regional anomalies / S. Bravo, E. García-Ordiales, F.J. García-Navarro, J.Á. Amorós, C. Pérezdelos-Reyes, R. Jiménez-Ballesta, J.M. Esbrí, E.M. García Noguero, P. Higuera // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – V. 26. – Iss. 4. – P. 3100–3114.
23. Evaluation of geochemical baselines and metal enrichment factor values through high ecological quality reference points: a novel methodological approach / R. Selvaggi, B. Damianić, E. Goretti, M. Pallottini, C. Petroselli, B. Moroni, G. La Porta, D. Cappelletti // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – Iss. 1. – P. 930–940.
24. Кац Д.М., Шестаков В.М. Мелиоративная гидрогеология. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 296 с.
25. Cronmiller J.G., Noble B.F. The discontinuity of environmental effects monitoring in the Lower Athabasca region of Alberta, Canada: institutional challenges to long-term monitoring and cumulative effects management // *Environmental Reviews*. – 2018. – V. 26. – Iss. 2. – P. 169–180.

*Поступила 20.09.2021 г.*

#### **Информация об авторах**

**Гюльмамедов Ч.Д. оглы**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Азербайджанского научно-производственного объединения «Гидротехника и Мелиорация».

UDK 626/627 626.86.004.67

## INFLUENCE OF THE VERKHE-SHIRVAN CANAL ON CHANGES OF HYDROGEOLOGICAL AND MELIORATIVE CONDITIONS OF THE SHIRVAN STEPPE OF AZERBAIJAN

**Chingiz Cahangir oglu Gulmammadov,**  
gcin56@mail.ru

Azerbaijan Scientific and Production Association «Hydraulic engineering and melioration»,  
324, I. Dadashov street, Baku, 1130, Azerbaijan.

**The relevance** of the research consists in studying the change of the level, chemical content, conditions of formation, regime of groundwater and salinity of soils under the influence of anthropogenic factors over a long period of time and in this background the formation of hydrogeological-meliorative conditions.

**The main aim** is to study the change of the hydrogeological-meliorative conditions under the anthropogenic influence in the territories of its effect zone after putting into operation Verkhne-Shirvan canal.

**Objects** of the research are the effect zone of the Verkhne-Shirvan canal of Shirvan plain of the Republic of Azerbaijan.

**Methods.** Based on the results of research conducted by the author on the level, mineralization degree of groundwater and salinity of soils over a long period of time and the data collected, the hydrogeological-meliorative division into districts was carried out.

**Results.** Due to the operation of the Verkhne-Shirvan canal, the level of groundwater, the degree of mineralization, the chemical content and the salinity and chemical content of the salts have changed in its effect zone. From 1958 to 2018 groundwater in this area rose by more than 4,0 m due to irrigation reclamation, and their mineralization degree decreased by 16,0 g/l due to infiltration of surface water and removal of mineralized water through drainage. The groundwater regime in the whole is formed by irrigation of lands and drainage. Hydrogeological-meliorative zoning of the area was carried out based on the results of research on changes in the level of subsoil water, chemical composition and salinity of soils and analysis of collected archival materials. A province-the Kur synclorium, one zone, semi-steppe with temperate-hot climate and dry-steppe with dry climate, three districts and four sub-districts are allocated. The first region covers the ends of the cones of river networks. The filtering coefficient of the rocks of the water-bearing horizons is 4–10 m/day, the degree of mineralization of groundwater is 1–5 g/l, their slope depth is 6–10 m. The second area covers the middle parts of the cones of the rivers, the filtering coefficient of proluvial sediments varies in the range of 3–5 m/day, the degree of mineralization of groundwater is 5–6 g/l their slope depth is 1,5–6,0 m. The third region covers the alluvial plain of the Kura River. The filtering coefficient of the rocks where the water is located reaches 1–10 m/day, the degree of mineralization of groundwater increases to 1–50 g/l, the slope depth is 1–3 m.

### Key words:

Impact, canal, subsoil waters, mineralization, chemical composition, ground water level, salting, land reclamation division into districts.

### REFERENCES

1. Aliev F.Sh. *Podzemnye vody Azerbaidzhanskoj respubliky, ispolzovanie zapasov i geologicheskie problemy* [Underground waters of the Azerbaijan Republic, use of reserves and geological problems]. Baku, Chashyogly Publ., 2000. 325 p.
2. Ahmad-zada A.D., Khashimov A.C. *Kadastr podzemnykh i vodokhozyaystvennykh sistem* [Inventory of underground and water management systems]. Baku, Azernashr Publ., 2006. 626 p.
3. Gulmammadov Ch.D., Zhafarly Zh.V. Groundwater regime of the Shirvan steppe of the Azerbaijan Republic. *International journal «Science and World»*, 2019, vol. I, no. 1 (65), pp. 22–26. In Rus.
4. Khasaev Q.A., Ismailov S.M., Asadov M.Ya., Abdullaev P.A., Danyalov Sh.D., Magerramov G.M., Rakhimova A.G. *Otsenka gidrogeologo-meliorativnogo usloviya zemel, raspolozhennykh v zone vliyaniya VSHK, i razrabotka nauchno obosnovannykh meropriyatiy dla ikh uluchsheniya* [Assessment of the hydrogeological and meliorative conditions of lands located in the zone of influence of the MSC, and development of scientifically based measures to improve them]. Azerbaijan Hydrotechnical and Melioration Scientific Production Association annual report. Baku, 2019. 65 p.
5. Kurennoy V.V., Shpak A.A. Monitoring geologicheskoy sredy – osnova ekologicheskoy otsenki tekhnogennykh izmeneniy geologicheskoy sredy [Monitoring of the geological environment – the basis for environmental assessment of technogenic changes in the geological environment]. *Exploration and protection of mineral resources*, 1999, no. 12, pp. 46–49.
6. Gulmammadov Ch.D. Interrelation of surface and underground waters of the Shirvan steppe of Azerbaijan. *International scientific journal*, 2018, vol. II, no. 10 (62), pp. 14–20. In Rus.
7. *Gologiya Azerbaydzhana. T. VIII. Gidrogeologiya i injenernaya geologiya* [Geology of Azerbaijan. Vol. VIII. Hydrogeology and engineering geology]. Ed. by A.B. Alekperov. Baku, Nafta-Press 2008. 368 p.
8. Listengarten V.A. *Formirovanie resursov podzemnykh vod allyuvialno-prolyuvialnykh ravnin* [Formation of groundwater resources of alluvial and proluvial plains]. Baku, Elm Publ. house, 1987. 164 p.
9. Jackson J., Priestley K., Allen M. Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International*, 2002, vol. 148, Iss. 2, pp. 214–245.
10. Gulmammadov Ch.D. Influence of technogenic activity of a man on hydrogeological conditions. *International scientific journal*, 2020, vol. I, no. 2 (78), pp. 15–19. In Rus.
11. Kurennoy V.V., Kurennoy L.M., Sokolovsky L.G. *Obsheee gidrogeologicheskoe rayonirovanie* [General hydrogeological zoning]. *Kontsepsiya i realizatsiya. Razvedka i okhrana neдр*, 2009, no. 9, pp. 42–48.
12. Alimov A.K. *Gidrogeologicheskie protsessy i kolichestvennyye otsenki istochnikov formirovaniya elementov vodno-solevogo balansa gruntovykh vod dlya obosnovaniya gidrogeologo-meliorativnykh prognozov* [Hydrogeological processes and quantitative assessments of the sources of formation of the elements of the water-salt balance of soil and water for the substantiation of hydrogeological and reclamation assessments]. Baku, Elm Publ., 2001. 294 p.
13. Barthel R.A. Call for more fundamental science in regional hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 507–510.
14. Montcoudiol N., Molson J., Lemieux J.-M. Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Quebec, Canada): a regional-scale study. *Hydrogeology Journal*, 2014, vol. 23, no. 2, pp. 377–396.
15. Wang J., Zuo R., Caers J. Dickovering geochemical patterns by faktor-based cluster analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, no. 181, pp. 106–115.

16. Amalfitano S., Bon A.D., Zoppini A., Ghergo S., Fazi S., Parrone D., Casella P., Stano F., Preziosi E. Groundwater geochemistry and microbial community structure in the aquifer transition from volcanic to alluvial areas. *Water Resources*, 2014, vol. 65, pp. 384–394.
17. Burnett W.C. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of the Total Environment*, 2006, pp. 498–543.
18. Israfilov Yu.G. Nauchno-tehnicheskie osnovy regulirovaniya podzemnogo stoka na konusakh vynosa. Sovremennye problemy ratsionalnogo i kompleksnogo ispolzovaniya vodnykh resursov [Scientific and technical foundations for the regulation of underground runoff on alluvial cones. Modern problems of rational and complex use of water resources]. *Trudy AzNII vodnykh problem*. Baku, 2000. pp. 83–85.
19. Sepúlveda L.D., Lecomte K.L., Pasquini A.I., Mansilla E.G., Chaparro M.A.E. Geochemical and magnetic properties of sediments as pollution indicators. Case study: Suquia river, Córdoba, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2019, vol. 36, pp. 183–194.
20. Israfilov Yu.G. *Formirovanie, prognoz i ratsionalnoe ispolzovanie resursov presnykh podzemnykh vod predgornyykh ravnin Azerbaidzhanskoy respubliky*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Formation, forecast and rational use of resources fresh underground waters of waste plains of the Republic of Azerbaijan. Cand. Diss. Abstract]. Baku, 2005. 48 p.
21. Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gorniy Altai). *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, no. 4, pp. 364–370.
22. Bravo S., García-Ordiales E., García-Navarro F.J., Amorós J.Á., Pérezde-los-Reyes C., Jiménez-Ballesta R., Esbrí J.M., García Noguero E.M., Higuera P. Geochemical distribution of major and trace elements in agricultural soils of Castilla La Mancha (central Spain): finding criteria for baselines and delimiting regional anomalies. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, Iss. 4, pp. 3100–3114.
23. Selvaggi R., Damianić B., Goretti E., Pallottini M., Petroselli C., Moroni B., La Porta G., Cappelletti D. Evaluation of geochemical baselines and metal enrichment factor values through high ecological quality reference points: a novel methodological approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, Iss. 1, pp. 930–940.
24. Kats D.M., Shestakov V.M. *Meliorativnaya gidrogeologiya* [Reclamation hydrogeology]. Moscow, Moscow State University Publ. house, 1981. 296 p.
25. Cronmiller J.G., Noble B.F. The discontinuity of environmental effects monitoring in the Lower Athabasca region of Alberta. Canada: institutional challenges to long-term monitoring and cumulative effects management. *Environmental Reviews*, 2018, vol. 26, Iss. 2, pp. 169–180.

Received: 20 September 2021.

#### Information about the author

**Chingiz Cahangir oglu Gulmammadov**, Dr. Sc., assistant professor, Azerbaijan Scientific and Production Association «Hydraulic engineering and melioration».

УДК 681.2:681.722:534.838.7

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА ГАЗООЧИСТКИ ОТ ЧАСТИЦ РАЗМЕРОМ МЕНЕЕ 2,5 МКМ

**Хмелев Владимир Николаевич**<sup>1</sup>,  
vnh@bti.secna.ru

**Шалунов Андрей Викторович**<sup>1</sup>,  
shalunov@bti.secna.ru

**Боченков Александр Сергеевич**<sup>1</sup>,  
sanya.bochankov@mail.ru

**Нестеров Виктор Александрович**<sup>1</sup>,  
nva@u-sonic.ru

<sup>1</sup> Бийский технологический институт (филиал)  
«Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова»,  
Россия, 659305, г. Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27.

**Актуальность** исследования обусловлена отсутствием эффективных методов и средств борьбы с загрязнением атмосферы субмикронными частицами размером менее 2,5 мкм. Применяемое для этих целей ультразвуковое воздействие не позволяет обеспечить степень укрупнения дисперсных частиц, достаточную для их осаждения или улавливания существующим газоочистным оборудованием. Как показывают экспериментальные исследования, даже при максимальном уровне звукового давления (при превышении которого инициируется обратный процесс – диспергирование капель или разрушении агломератов частиц) эффективность ультразвуковой коагуляции оказывается недостаточной, особенно при малой счетной концентрации частиц. Это обуславливает необходимость выявления новых физических эффектов и разработки новых способов воздействия, повышающих эффективность коагуляции тонкодисперсных частиц.

**Цель:** разработка способа для повышения эффективности ультразвуковой коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм за счет формирования вихревых акустических течений в тонком воздушном промежутке между излучателем и отражателем и создание устройства для его практической реализации.

**Результаты.** Предложен новый способ и устройство для очистки газов от дисперсных частиц размером менее 2,5 мкм за счет увеличения времени ультразвукового воздействия на каждую частичку и создания зон локального увеличения концентрации субмикронных частиц. Это обеспечивается за счет формирования вихревых потоков между излучающей (в виде изгибно-колеблющегося диска) и отражающей поверхностями. Локальная зона повышенной концентрации частиц формируется в периферийной области вихря за счет дрейфа частиц под действием центробежных сил из центральной области вихря к его периферии. Предложенный способ обеспечивает повышение эффективности с 13 до 50 %, в зависимости от исходной концентрации дисперсных частиц.

### **Ключевые слова:**

Ультразвук, ультразвуковая коагуляция, излучатель, вихревые потоки, аэрозоль.

### **Введение**

В последнее время большое внимание уделяется повышению эффективности способов газоочистки, особенно от частиц размером менее 2,5 мкм, обладающих высокой общей поверхностью (55 % и более от общей поверхности частиц) и счетной концентрацией (95 % и более от суммарной счетной концентрации содержащихся в атмосфере). Из-за малых размеров подобные частицы, задерживаясь в воздухе долгое время, оказывают негативное влияние на здоровье человека.

Реализуемые в настоящее время способы коагуляции основаны на различных физических явлениях и принципах воздействия на загрязняющие газ частицы, например, на процессах инерции и центробежных явлениях [1]. Эффективность практической реализации этих способов коагуляции может достигать 70–90 % для частиц размером более 5–10 мкм. На меньшие по размерам частицы воздействие практически не оказывается. Принято считать, что обусловлено это отсутствием эффективных физических механизмов воздействия на меньшие по размерам (в том числе субмикронные) частицы.

Поскольку звуковые колебания высокой интенсивности крайне опасны для окружающего мира, возникает необходимость использовать ультразвуковые колебания ( $f > 20$  кГц). УЗ воздействие абсолютно безопасно для окружающих даже при высокой силе ультразвука ( $L > 150$  дБ). Поэтому наиболее эффективные способы удаления субмикронных частиц основаны на применении ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности, которые способны осуществлять дополнительное воздействие и на газовую среду, и на частицы в ней. При этом воздействие УЗ колебаниями на газовые среды создаёт два типа нелинейных эффектов [2, 3], влияющих на дисперсные частицы в газах:

- эффекты, возникающие за счёт явлений переноса импульса газовой фазы между частицами;
- эффекты, возникающие за счёт колебательных движений твердых частиц друг относительно друга.

Первая группа эффектов обуславливает гидродинамический механизм (впервые описанный В. Кёнигом в 1891 г.) агломерации частиц, когда эквивалентные силы гидродинамического взаимодействия (переносчиками взаимодействия выступают молекулы

сплошной газовой фазы) приближают частицы друг к другу и способствуют их агломерации. При наложении УЗ колебаний отдельные частицы подвергаются воздействию колебаний и потоков окружающего газа, начинают двигаться быстрее, вероятность их столкновений с другими частицами возрастает, они чаще соударяются и объединяются. Происходит увеличение их размеров, вследствие чего становится возможным дальнейшее улавливание укрупненных частиц при помощи различных известных способов, реализуемых, например, с помощью сепараторов [4–8].

Однако при очистке газов от частиц размером менее 2,5 мкм данная сила взаимодействия оказывается малой, поскольку она фактически пропорциональна 6-й степени диаметра частиц. Поэтому, например, для частиц размером 2,5 мкм эта сила в 64 раза меньше, чем для частиц размером 5 мкм. Кроме того, при малых концентрациях частиц существенно уменьшает силу взаимодействия большое расстояние между частицами.

В свою очередь, вторая группа эффектов реализуется в ортокINETическом механизме (впервые описанным Брандтом, Х. Фройндом, Е. Хидеманом), заключающемся в том, что частица колеблется с газовой фазой не синхронно, а осуществляет скольжение относительно газовой фазы и колеблется с меньшей амплитудой смещения, чем сам газ. Эффект скольжения связан с инерционностью частицы. Для частиц тонкодисперсных размером менее 2,5 мкм модуль коэффициента увлечения близок к 1, т. е. все частицы колеблются практически одинаково, и соответственно, ортокINETическое взаимодействие также не реализуется [4, 7].

Поэтому даже способы коагуляции, основанные на применении ультразвукового воздействия, теоретически являются малоэффективными, и по данным многочисленных исследований [4, 9–12] эффективность способов УЗ коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее не превышает 20–35 %.

К сожалению, предельные возможности ультразвукового воздействия при коагуляции тонкодисперсных частиц (2,5 мкм и менее) до настоящего времени экспериментально не определены. Это не позволяет реализовывать практические конструкции ультразвуковых коагуляторов с максимальной эффективностью и, главное, не дает возможности выявлять пути решения проблемы дальнейшего повышения эффективности УЗ коагуляции мелких частиц размером 2,5 мкм и менее.

Поэтому появляется необходимость проведения исследований для выявления предельных возможностей ультразвукового воздействия и выявления путей дальнейшего развития ультразвуковой коагуляции тонкодисперсных частиц

#### **Стенд для исследования ультразвуковой коагуляции субмикронных частиц**

Для проведения экспериментов был предложен и разработан специализированный стенд для измерения эффективности ультразвуковой коагуляции. Основное требование к создаваемому стенду – обеспечение

максимально возможного (предельного) УЗ воздействия на очищаемый газ. Очевидно, что необходимым и достаточным должно стать УЗ воздействие с силой звука 160 дБ (интенсивностью 1 Вт/см<sup>2</sup>). Воздействие с большей силой звука будет осуществлять не только коагулирующее воздействие, но и разрушать объединения (конгломераты) частиц или просто распылять жидкие частицы [9–11].

В качестве коагулируемых частиц было принято решение использовать жидкие частицы калиброванного размера, создаваемые при помощи специального устройства – компрессорного генератора Toras ATM 226 с регулируемым объемом потока аэрозолей. Генератор Toras ATM 226 обеспечивает формирование аэрозоля со стабильными во времени дисперсными характеристиками: размеры формируемых частиц в интервале 0,1–2,5 мкм и объемное содержание 10<sup>8</sup> частиц/см<sup>3</sup>. В качестве распыляемой жидкости применена известная аэрозольная жидкость DENHS.

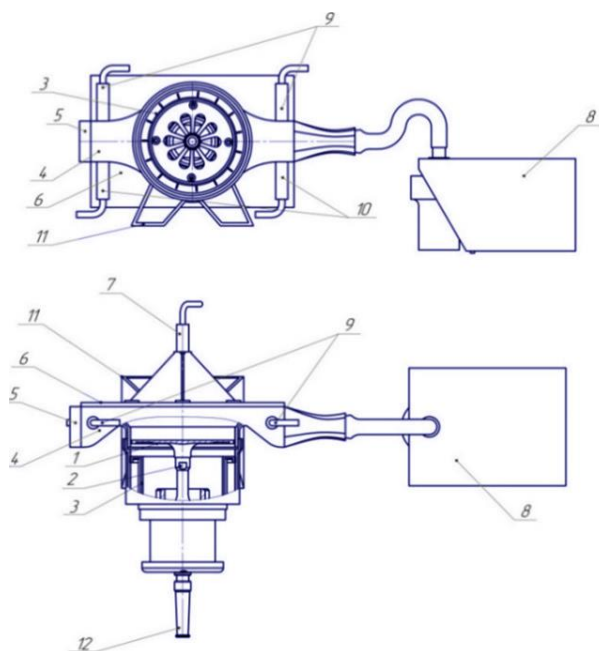
Конструктивное исполнение стенда показано на рис. 1. Представленный стенд реализует различные условия воздействия УЗ колебаниями, а также позволяет измерять эффективность ультразвуковой коагуляции по отношению оптической плотности аэрозоля на выходе и входе коагуляционной камеры. Стенд включает в себя следующие составные блоки:

- коагуляционная камера;
- ультразвуковая колебательная система (УЗКС) в комплекте с излучателем ультразвуковых колебаний;
- генератор колебаний ультразвуковой частоты, предназначенный для питания УЗКС и позволяющий формировать уровень звукового давления в камере 130–160 дБ;
- генератор тонкодисперсных аэрозолей, способный обеспечить формирование мелких капель размером до 1 мкм;
- блок оптического измерительного устройства; Коагуляционная камера включает:
- пространство, в котором происходит воздействие на формируемый аэрозоль колебаниями ультразвуковой частоты с прозрачными боковыми стенками;
- входной патрубков, соединенный с генератором аэрозолей;
- выходной патрубков с установленным вентилятором для обеспечения транспортирования аэрозоля через коагуляционную камеру. Вентилятор обеспечивает скорость потока равную 0,85 м/с;
- на входном и выходном патрубках предусмотрены расположенные друг против друга отверстия для установки оптических пар: инфракрасный светодиод – фотоприемник, обеспечивающие измерение оптической плотности аэрозоля.

Для обеспечения максимального ультразвукового воздействия в предложенном стенде был реализован режим резонансного усиления колебаний в коагуляционной камере при помощи круглого металлического отражателя. Для обеспечения резонансных режимов и установления различных уровней ультразвуко-



вого давления в стенде была реализована возможность регулировать расстояние между излучателем и отражателем путем перемещения излучателя вдоль вертикальной оси коагуляционной камеры [12, 13].



**Рис. 1.** Конструкция экспериментального стенда: 1) ультразвуковой излучатель; 2) пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система; 3) фланец; 4) коагуляционная камера; 5) вентилятор; 6) отражательная пластина; 7) микрофон; 8) генератор газодисперсной взвеси (аэрозоля); 9) фотодиоды выходного и входного каналов, работающие в инфракрасном диапазоне; 10) светодиоды выходного и входного каналов, работающие в инфракрасном диапазоне; 11) опорная рама стенда; 12) кабель питания излучателя ультразвуковых колебаний

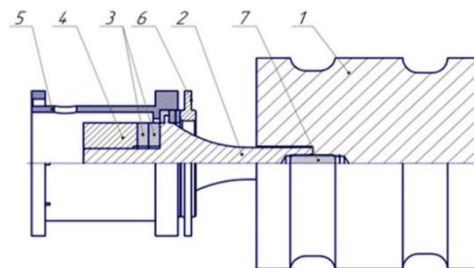
**Fig. 1.** Design of the experimental stand: 1) ultrasonic radiator; 2) piezoelectric ultrasonic oscillating system (UPOS); 3) UPOS flange; 4) coagulation chamber; 5) fan; 6) transparent reflector; 7) microphone; 8) gaseous suspension (aerosol) generator; 9) infrared photodiodes of input and output channels; 10) infrared LEDs for input and output channels; 11) stand support; 12) cable for power supply of the ultrasonic radiator

Как следует из описания стенда, его основу составляет источник УЗ воздействия – ультразвуковая колебательная система со специальными излучателями.

#### Устройство создания УЗ колебаний с продольно-колеблющимся излучателем

Для определения предельных возможностей УЗ воздействия при коагуляции тонкодисперсных аэрозолей в режиме плоской стоячей волны (наиболее частот встречающемся на практике) была разработана УЗКС с продольно-колеблющимся излучателем. Основой конструкции данного излучателя служит тело цилиндрической формы резонансной (полуволновой) длины, соединенное с электроакустическим преобразо-

зователем. Эскиз УЗКС вместе с поршневым продольно-колеблющимся излучателем представлен на рис. 2 [13, 14].

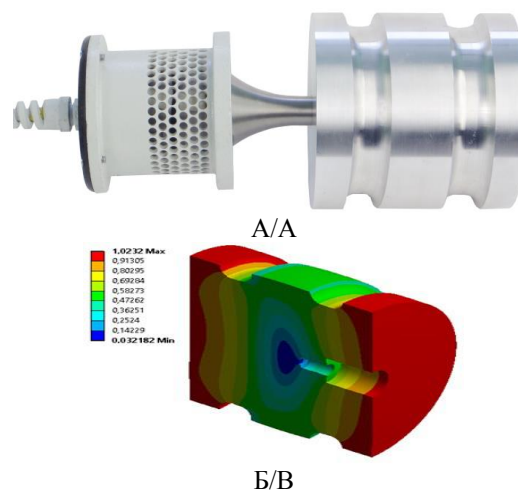


**Рис. 2.** Эскиз УЗКС с поршневым излучателем: 1) излучатель УЗ колебаний; 2) концентратор-усилитель механических колебаний; 3) пьезокерамические элементы; 4) отражающая накладка; 5) корпус УЗКС; 6) фланец; 7) шпилька

**Fig. 2.** Sketch of an ultrasonic vibrating system with a piston-type radiator: 1) ultrasonic radiator; 2) concentrator of the piezoelectric transducer; 3) piezoceramic elements; 4) reflective pad; 5) body; 6) flange; 7) hairpin

Для обеспечения максимальной равномерности колебаний торцевой поверхности было предложено выполнить кольцевые проточки [12–14].

На рис. 3 представлена фотография УЗКС с излучателем поршневого типа и форма колебаний излучателя.



**Рис. 3.** Фотография (А) и распределение колебаний УЗ излучателя поршневого типа (Б)

**Fig. 3.** Photo of the piston-type radiator (А); oscillation mode of piston-type ultrasonic radiator (Б)

В табл. 1 представлены основные технические характеристики ультразвукового излучателя поршневого типа.

Для питания созданного излучателя был использован ультразвуковой генератор (рис. 4), позволяющий создать, совместно с ультразвуковым излучателем, внутри коагуляционной камеры уровень звукового давления 130–160 дБ. Генератор позволяет устанавливать и контролировать время и уровень мощности ультразвукового воздействия [15].

**Таблица 1.** Технические характеристики ультразвукового излучателя поршневого типа

**Table 1.** Technical characteristics of piston-type radiator

Параметр/Parameter	Значение/Value
Тип излучающего элемента Radiating element type	Поршневой продольно-колеблющийся Piston-type longitudinally oscillating
Диаметр поверхности излучателя, мм Radiating surface diameter, mm	104
Рабочая частота, кГц Operation frequency, kHz	23,5
Максимальная потребляемая электрическая мощность, Вт Electric power, W	90
Уровень звукового давления на дистанции 1 м, не менее дБ Sound pressure level at a distance of 1 m, dB	145



**Рис. 4.** Ультразвуковой генератор

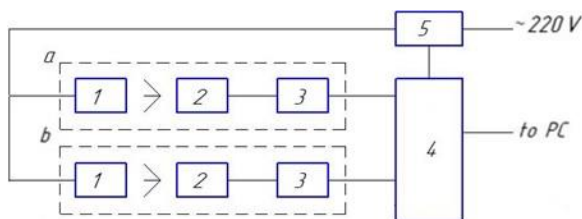
**Fig. 4.** Ultrasonic generator

Представленный ультразвуковой излучатель способен обеспечить предельно возможное воздействие для коагуляции тонкодисперсных и субмикронных частиц в газовых потоках.

#### Устройство для измерения оптической плотности аэрозоля

Устройство основано на измерении оптической плотности очищаемого газа.

Система определения оптической плотности аэрозоля реализована на микроконтроллере семейства AVR. Структурная схема измерительного устройства представлена на рис. 5.



**Рис. 5.** Блок-схема устройства для измерения оптической плотности аэрозоля: 1) светодиод, работающий в инфракрасном диапазоне; 2) фотодиод, работающий в инфракрасном диапазоне; 3) усилитель сигнала с фотодиода; 4) микроконтроллер; 5) блок питания; a, b) входной и выходной каналы для измерения

**Fig. 5.** Block-diagram of a device for measuring the optical density of an aerosol: 1) infrared LED; 2) infrared photodiode; 3) amplifier photodiode signal; 4) microcontroller; 5) power supply; a, b) input and output channels for measurement

Оптическая плотность определяется по отношению электрических сигналов на выходах инфракрасных фотодиодов, установленных на выходе и входе из камеры.

Измерение оптической плотности аэрозоля осуществляется следующим образом. Световой поток со светодиодов, работающих в инфракрасном диапазоне, проходит через входной (рис. 5, a) и, соответственно, выходной (рис. 5, b) патрубок коагуляционной камеры, заполненные аэрозолем.

Световой поток частично рассеивается на каплях аэрозоля, а оставшаяся его часть попадает на блок преобразования и усиления измерительного сигнала, который представлен операционным усилителем AD712JNZ и инфракрасным фотодиодом. Полученный сигнал, пропорциональный оптической плотности аэрозоля, поступает на аналогово-цифровой преобразователь микроконтроллера AVR Atmega48. По запросу измерительное устройство передает полученные данные на персональный компьютер через последовательный порт RS-232.

Перед проведением измерений выполнялась калибровка измерительного устройства посредством обеспечения равенства снимаемых с фотодиодов на входе и выходе сигналов при отсутствии аэрозоля. На основе отношения значений оптической плотности аэрозоля на выходе и входе коагуляционной камеры рассчитывалась эффективность процесса коагуляции по следующей формуле:

$$\delta = \left( 1 - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{A_{\text{ВХ}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $A_{\text{ВЫХ}}$  и  $A_{\text{ВХ}}$  – измеренные значения сигнала на фотодиодах, установленных на выходе и входе камеры, соответственно.

Величины  $A_{\text{ВЫХ}}$  и  $A_{\text{ВХ}}$  определялись по формуле:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^n A_j}{n} - A_0, \quad (2)$$

где  $A_0$  – величина выходного сигнала, соответствующая состоянию воздушной среды, свободной от дисперсных примесей (аэрозоля);  $A_j$  – отдельный элемент в измерительной последовательности;  $n$  – количество элементов измерительной последовательности, равное 10;  $j$  – номер элемента [12–14].

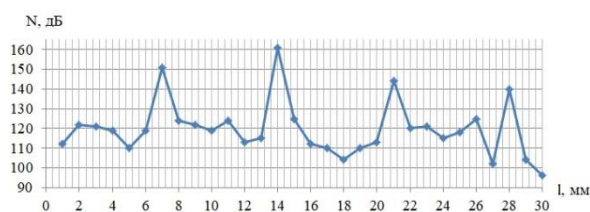
Кроме того, в процессе УЗ воздействия на аэрозоль в коагуляционной камере осуществлялось визуальное наблюдение за движением аэрозольных частиц через прозрачные боковые стенки для выявления возможных неоднородностей и потоков. Фиксация осуществлялась при помощи цифровой фотокамеры. Для поршневого излучателя формирования акустических потоков не наблюдалось.

#### Определение уровня звукового давления и эффективности поршневого излучателя

Уровень звукового давления определялся в тонком промежутке при различных расстояниях между по-

верхностями поршневого излучателя и отражателя. Измерения проводились шумомером Экофизика-110А (способен работать в ультразвуковом диапазоне частот до 40 кГц). Микрофон шумомера размещался по центру отражателя. При измерении уровня звукового давления расстояние между излучателем и отражателем дискретно изменялось с шагом 1 мм за счет перемещения ультразвукового излучателя с пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системой (рис. 1, поз. 1, 2, соответственно). В каждой точке уровень звукового давления измерялся в течение 1 минуты, после чего результаты измерений усреднялись. Во время измерения уровня звукового давления подача аэрозоля в коагуляционную камеру не осуществлялась.

Зависимость уровня звукового давления от расстояния между поверхностями поршневого излучателя и отражателя представлена в виде графика (рис. 6).



**Рис. 6.** График уровня звукового давления в зависимости от отношения расстояния между поверхностями поршневого продольно-колеблющегося излучателя и отражателя

**Fig. 6.** Graph of the sound pressure level depending on the ratio of the distance between the surfaces of the piston longitudinally oscillating radiator and the reflector

Выраженные колебания, наблюдаемые на графике на рис. 6, вызваны образованием резонансных явлений в тонком воздушном промежутке между поверхностью излучателя и отражателя.

Из результатов измерений следует, что используемый излучатель на резонансном промежутке, равном одной длине волны, формирует максимальный уровень звукового давления 160 дБ [7, 16–18].

Результаты исследования эффективности процесса ультразвуковой коагуляции для поршневого продольно-колеблющегося излучателя относительно расстояния до поверхности отражателя представлены на гистограмме на рис. 7.

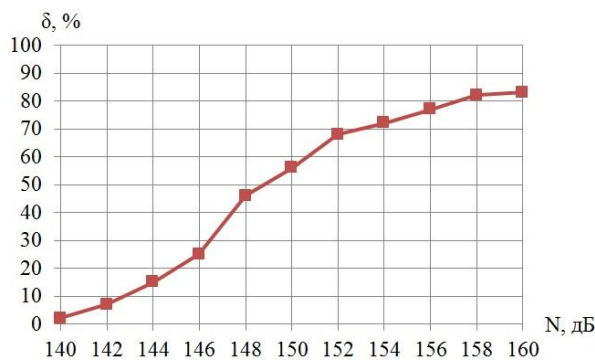


**Рис. 7.** Гистограмма эффективности коагуляции в зависимости от расстояния между поверхностью поршневого продольно-колеблющегося излучателя и поверхностью отражателя

**Fig. 7.** Bar chart of coagulation efficiency as a function of the distance between the surface of the piston longitudinally oscillating radiator and the surface of the reflector

Из анализа гистограммы следует, что пик эффективности коагуляции приходится на расстояние одной длины волны ультразвуковых колебаний (14 мм). На этом расстоянии эффективность коагуляции достигает своего максимума.

На рис. 8 представлено отношение эффективности коагуляции к уровню звукового давления, полученного на резонансном расстоянии между излучателем поршневого типа и отражателем равным одной длине волны.

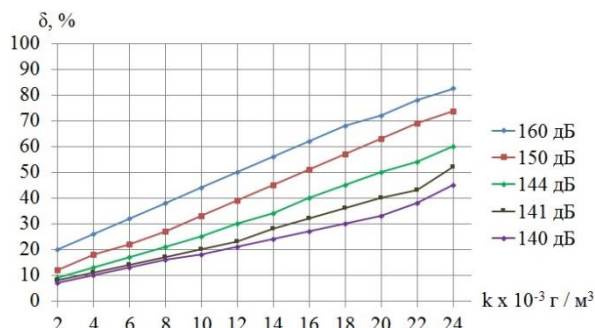


**Рис. 8.** Отношение эффективности ультразвуковой коагуляции к уровню звукового давления для поршневого излучателя

**Fig. 8.** Dependence of the efficiency of ultrasonic coagulation on the level of sound pressure for a piston-type radiator

Анализ зависимости на рис. 8 позволил установить, что эффективность коагуляции с использованием излучателя поршневого типа достигает своего максимума, равного 83 %, при уровне звукового давления в 160 дБ. Это значение следует считать предельной эффективностью ультразвуковой коагуляции частиц размером 2,5 мкм в максимально возможном по силе ультразвукового воздействия поле механических колебаний, создаваемых излучателем поршневого типа.

Далее были проведены эксперименты по исследованию эффективности процесса коагуляции при помощи поршневого излучателя при различных концентрациях аэрозоля. Результаты эксперимента представлены на рис. 9.



**Рис. 9.** Зависимость эффективности коагуляции от начальной концентрации аэрозоля для излучателя поршневого типа

**Fig. 9.** Dependence of the coagulation efficiency on the initial concentration for a piston-type radiator

Как следует из представленных зависимостей, эффективность коагуляции существенным образом зависит от начальной концентрации аэрозоля. При малых концентрациях ( $2\text{--}4\text{ мг/м}^3$ ) эффективность коагуляции в режиме плоской стоячей волны (формируемой плоским излучателем) не превышает 30 %, что делает нецелесообразным ее применение.

Таким образом, проведенные исследования для случая УЗ воздействия в режиме плоской стоячей волны позволили установить предельные возможности ультразвуковой коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее, т. е. установить значение предельной эффективности ультразвуковой коагуляции, равное 83 %.

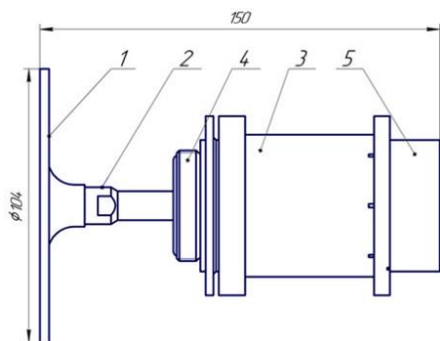
#### Создание нового способа УЗ коагуляции

Очевидно, что повысить эффективность коагуляции субмикронных частиц можно за счет повышения времени УЗ воздействия на каждую частичку и создания зон локального увеличения концентрации тонкодисперсных и субмикронных частиц. Практически это может быть обеспечено путем формирования вихревых потоков между излучающей и отражающей поверхностями. Такие потоки должны обеспечить повышение эффективности ультразвуковой коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм. Поэтому для проведения дальнейших исследований предпринята попытка создания иных условий в ультразвуковых полях, формируемых при помощи других известных типов ультразвуковых излучателей (способных создавать аналогичные по силе звука воздействия).

#### Устройство создания УЗ колебаний с изгибно-колеблющимся излучателем

Излучатель был выполнен в виде изгибно-колеблющегося диска с центральным возбуждением от пьезоэлектрической колебательной системы. Ультразвуковые колебания, как правило, возбуждаются на кратных основной моде колебаний (3, 5, 7 и т. д.).

На рис. 10 представлен эскиз УЗКС с излучателем в виде изгибно-колеблющейся пластины (диска) [12, 13].



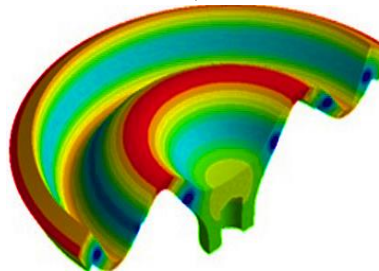
**Рис. 10.** Эскиз УЗКС с излучателем в виде плоского диска: 1) дисковый излучатель; 2) пьезоэлектрический преобразователь; 3) корпус УЗКС; 4) фланец; 5) вентилятор

**Fig. 10.** Sketch of an ultrasonic oscillating system with a radiator in the form of a flexural-oscillating flat disk: 1) disk radiator; 2) piezoelectric transducer; 3) body; 4) flange; 5) fan

На рис. 11 представлена фотография УЗКС с дисковым излучателем и форма колебаний дискового излучающего элемента.



A/A



B/B

**Рис. 11.** Фотография изгибно-колеблющегося дискового излучателя (А); форма колебаний дискового излучающего элемента (Б)

**Fig. 11.** Photo of a flexural-oscillating disk radiator (A); oscillation mode of disk radiator (B)

В табл. 2 представлены основные технические характеристики изгибно-колеблющегося дискового излучателя.

**Таблица 2.** Технические характеристики изгибно-колеблющегося дискового излучателя для газовых сред

**Table 2.** Technical characteristics of flexural-oscillating disk radiator for gas environments

Параметр/Parameter	Значение/Value
Тип излучающего элемента Radiating element type	Дисковый изгибно-колеблющийся Disk flexural-oscillation
Диаметр излучающей поверхности, мм Radiating surface diameter, mm	104
Рабочая частота, кГц Operation frequency, kHz	23,5
Максимальная потребляемая электрическая мощность, Вт Electric power, W	60
Уровень звукового давления на дистанции 1 м, не менее дБ Sound pressure level at a distance of 1 m, dB	145

Как следует из представленных технических характеристик, такой ультразвуковой излучатель в виде плоского диска способен обеспечить необходимое ультразвуковое воздействие (аналогичное рассмотренному ранее) для реализации процесса ультразвуковой коагуляции тонкодисперсных частиц в газовых средах [11, 14].

### Визуальное наблюдение формирования акустических потоков

В процессе воздействия на аэрозоль в коагуляционной камере было установлено, что визуально можно наблюдать формирование вихревых акустических течений между дисковым излучателем и отражателем (рис. 12).

Для дискового излучателя вихревой поток заполняет весь промежуток между излучателем и отражателем. При этом на отражателе наблюдается осаждение капель, формирующих кольцевой рисунок (рис. 13).

При расстоянии между излучателем и отражателем равном  $\lambda/4$  осажденные на поверхности отражателя капли (образуются в результате ультразвуковой коагуляции аэрозоля) образуют концентрические кольца. При этом внутренние кольца имеют более правильную форму и более четкую границу, чем внешние кольца. При расстояниях 7 и 14 мм структура осадений также является регулярной, однако представляет собой сочетание пятен, равномерно покрытых осажденными каплями, и концентрических колец. При этом внешние кольца не замкнутые. Это, по-видимому, связано со структурой акустического поля в зазоре и формируемыми акустическими течениями.



Рис. 12. Формируемые акустические потоки вихревого типа дискового излучателя

Fig. 12. Formed acoustic flows of vortex-type disk radiator

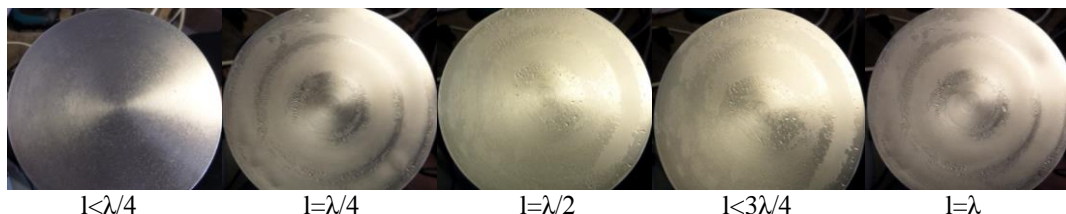


Рис. 13. Структуры, формируемые на отражателе осаждаемыми каплями

Fig. 13. Structures formed on a reflector by deposited drops

При расстояниях меньше 4 мм ( $\lambda/4$ ) и больше 14 мм ( $\lambda$ ) формирование вихревых потоков не происходит. При этом на расстояниях, превышающих 14 мм, наблюдается значительная турбулизация газокапельной взвеси, приводящая к снижению эффективности коагуляции аэрозоля. На отражателе при этом наблюдается хаотичное осаждение крупных капель аэрозоля диаметром 15–100 мкм. То есть ускоренного осаждения высокодисперсных частиц на отражателе не наблюдается.

Следовательно, при анализе имеющихся данных можно сделать вывод о факте возникновения в тонком промежутке между излучателем дискового типа и отражателем на определенных расстояниях вихревых акустических течений. Дальнейшие исследования были посвящены изучению влияния акустических вихрей на эффективность ультразвуковой коагуляции.

### Определение уровня звукового давления и эффективности изгибно-колеблющегося дискового излучателя

По аналогии с поршневым продольно-колеблющимся излучателем в виде графика представлены ре-

зультаты измерения уровня звукового давления для дискового изгибно-колеблющегося излучателя относительно расстояния до отражателя (рис. 14).

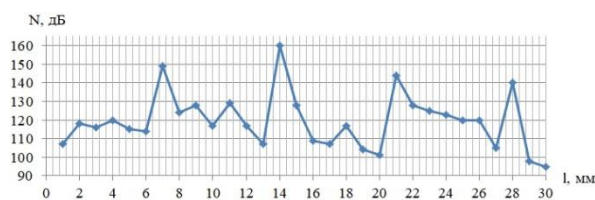


Рис. 14. График уровня звукового давления в зависимости от отношения расстояния между поверхностями дискового излучателя и отражателя

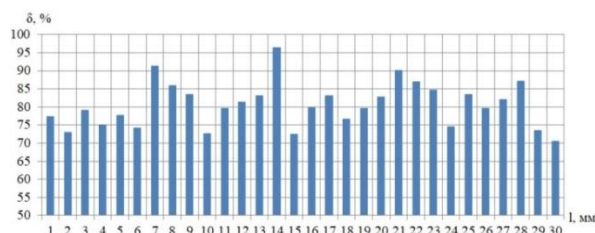
Fig. 14. Graph of the sound pressure level depending on the ratio of the distance between the surfaces the disk radiator and the reflector

При рассмотрении графика на рис. 14 можно сделать вывод, что аналогично поршневому продольно-колеблющемуся излучателю на резонансном промежутке, равном одной длине волны, формируется уровень звукового давления 160 дБ [8, 16–19].

При этом относительное отличие уровней звукового давления, формируемых дисковым и поршневым излучателями, при одинаковом расстоянии от отражателя не превышает  $\pm 2$  дБ во всем диапазоне расстояний. Следовательно, условия проведения экспериментальных исследований для обоих типов излучателей были одинаковы.

Равенство уровней звукового давления, формируемого излучателями обоих типов, позволяет провести сравнение эффективности коагуляции, обеспечиваемой излучателем, и определить влияние вихревых потоков, создаваемых изгибно-колеблющимся излучателем, на эффективность коагуляции.

Результаты эффективности коагуляции с использованием дискового излучателя представлены на рис. 15.

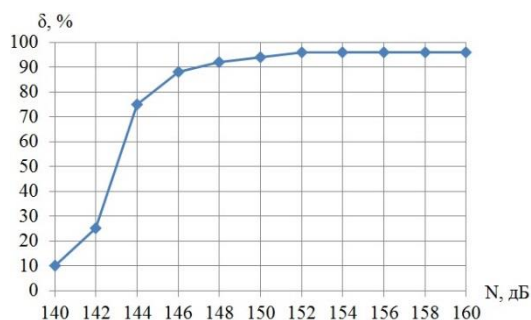


**Рис. 15.** Гистограмма эффективности коагуляции в зависимости от расстояния между поверхностью дискового излучателя и поверхностью отражателя

**Fig. 15.** Bar chart of coagulation efficiency as a function of the distance between the surface of the disk radiator and the surface of the reflector

Из сравнения гистограмм на рис. 7 и 15 следует, что для обоих излучателей пик эффективности коагуляции приходится на расстояние одной длины волны ультразвуковых колебаний. На этом расстоянии эффективность коагуляции достигает своего максимума.

На рис. 16 представлена зависимость эффективности коагуляции от уровня звукового давления, полученная на резонансном расстоянии одной длины волны между поверхностями дискового излучателя и отражателя.



**Рис. 16.** Отношение эффективности ультразвуковой коагуляции к уровню звукового давления для дискового излучателя

**Fig. 16.** Dependence of the efficiency of ultrasonic coagulation on the level of sound pressure for disk radiator

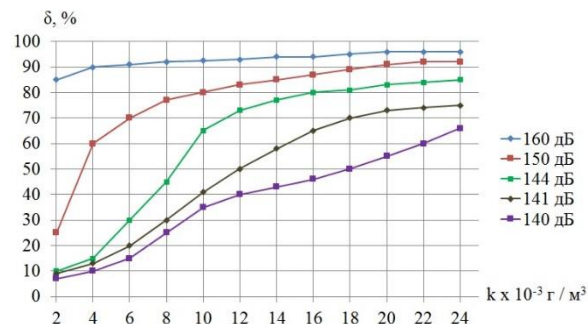
Из полученных результатов следует возможность обеспечения эффективности коагуляции, равной 96 %, для дискового излучателя (в сравнении с 83 % для излучателя поршневого типа).

для дискового излучателя (в сравнении с 83 % для излучателя поршневого типа).

Таким образом, эффективность коагуляции при помощи дискового излучателя, создающего акустические потоки вихревого типа, выше, чем при использовании излучателя поршневого типа, на 13 %. Так как условия проведения экспериментов были одинаковыми, то указанное повышение может быть обусловлено только созданием вихревых акустических течений. При их формировании создаются условия для дрейфа частиц под действием центробежных сил из центральной области вихря к его периферии. В результате обеспечивается локальное повышение концентрации частиц в периферийной области вихря, повышающее вероятность столкновения, а, следовательно, и коагуляции частиц под действием УЗ колебаний.

Проанализировав зависимость на рис. 16, можно сделать вывод, что эффективность коагуляции изгибно-колеблющегося дискового излучателя достигает своего максимума при более низких уровнях звукового давления. Для изгибно-колеблющегося дискового излучателя видно, что, начиная с уровня звукового давления в 150 дБ, эффективность коагуляции достигает своего максимального значения и практически (не более 2 %) перестает увеличиваться далее.

Также были проведены аналогичные эксперименты по исследованию эффективности процесса коагуляции дискового излучателя при различных концентрациях аэрозоля. Результаты исследований представлены на рис. 17.



**Рис. 17.** Зависимость эффективности коагуляции от начальной концентрации для дискового излучателя

**Fig. 17.** Dependence of coagulation efficiency on the initial concentration for a disk radiator

Из сравнения зависимостей на рис. 9 и 17 установлено, что при использовании дискового излучателя при малой концентрации частиц эффективность коагуляции значительно превышает эффективность излучателя поршневого типа. Эффективность коагуляции с использованием излучателя поршневого типа с увеличением концентрации частиц возрастает линейно и достигает своего максимального значения – 83 % – при значении концентрации  $24 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>3</sup>, в то время как эффективность с использованием дискового излучателя достигла своего максимума – 96 % – при концентрации уже  $18 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>3</sup>. Как уже упоминалось,

оба излучателя работали при одинаковом уровне звукового давления, поэтому можно предположить, что такая разница связана с формированием вихревых акустических потоков дисковым изгибно-колеблющимся излучателем.

При высоких начальных концентрациях аэрозоля ультразвуковое воздействие с формированием вихревых потоков дисковым излучателем целесообразно использовать на заключительной стадии процесса коагуляции, когда за счет воздействия ультразвуковых колебаний происходит снижение концентрации частиц, приводящее к квадратичному уменьшению вероятности агломерации частиц, а как следствие, и эффективности ультразвуковой коагуляции. То есть создание вихревых течений эффективно для сред с малой концентрацией частиц, потому что при характерных расстояниях между взвешенными частицами, намного превышающих их размер, силы гидродинамического взаимодействия частиц и амплитуда их колебательного движения оказываются недостаточными для сближения частиц на достаточное для их объединения расстояние. А за счет вихревых потоков концентрация локально повышается и за счет этого коагуляция имеет большую эффективность, чем без вихревых потоков [3, 12–14, 18, 19].

#### Устройство для практической реализации предложенного способа УЗ коагуляции с использованием вихревых потоков

Для практической реализации УЗ коагуляции с использованием вихревых потоков предложена практическая конструкция, в которой для создания высокоинтенсивных акустических полей используется пьезоэлектрическая колебательная система – 1, состоящая из: пьезоэлектрического преобразователя электрических колебаний в механические – 2, концентратора-усилителя механических колебаний – 3, излучателя-рабочего инструмента в виде пластины (диска) – 4 с плоской излучающей поверхностью. Перед излучающей поверхностью устанавливается отражающая ультразвуковые колебания поверхность – 5. Таким образом, ультразвуковая колебательная система устанавливается сверху коагуляционной камеры, формируемой между излучающей и отражающей поверхностями (рис. 18).

Через входной патрубок – 6, который располагается в центральной части отражающей поверхности, подается загрязненный частицам газ – 7, и он распространяется к периферическим областям отражающей поверхности в коагуляционной камере. Очищенный газ – 8 и скоагулированные (объединенные и увеличенные в размерах) частицы – 9 выводятся за пределы технологического объема через выходные патрубки – 10. В процессе прохождения газа между двумя плоскостями (отражателем и излучателем) осуществляется ультразвуковое воздействие изгибно-колеблющейся пластиной, на плоской излучающей поверхности которой формируются максимумы и минимумы колебаний, чередующиеся последовательно на расстоянии, соответствующем половине длины волны изгибных колебаний в материале пла-

стины на частоте не менее 22 кГц с интенсивностью не менее 160 дБ (рис. 18).

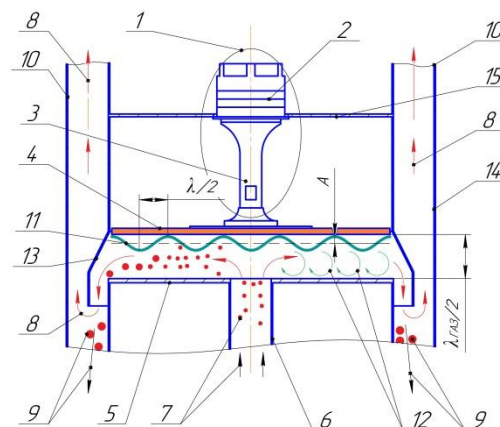


Рис. 18. Вариант реализации способа ультразвуковой коагуляции

Fig. 18. Variant of implementation of the method of ultrasonic coagulation

Пластина с плоской излучающей поверхностью формирует в зазоре между излучающей и отражающей поверхностями синусоидальное распределение амплитуд механических колебаний – 11. Благодаря созданию разнонаправленных колебательных движений на участках, отличающихся фазами на 180 градусов (условия создания разрежения и повышенного давления на области газа), образуются вихревые течения – 12. Инородные частицы, попадая в эти вихревые потоки, более длительное время подвергаются УЗ воздействию, формируются условия повышения концентраций частиц на участках изменений направления их движения (рис. 18).

При этом частицы, по мере их продвижения к периферической области коагуляционной камеры, последовательно попадают в каждый последующий сформированный вихрь, увеличиваясь в размерах. После коагуляции частицы уносятся потоком воздуха к периферическим областям камеры, где сталкиваются с перегородкой – 13, которая служит для разделения очищенного воздуха и скоагулированных частиц. Корпус – 14 служит для обеспечения защиты расположенных внутри элементов от механических повреждений в процессе эксплуатации или хранения, а также для защиты от пыли, влаги и любых других внешних воздействий. За фланец – 15 крепится ультразвуковая колебательная система (рис. 18).

Таким образом, в предложенном устройстве для УЗ коагуляции создание вихревых потоков за счет формирования УЗ колебаний в резонансном промежутке значительно увеличивает время и эффективность УЗ воздействия на загрязняющие газ частицы, а, следовательно, и саму эффективность процесса коагуляции частиц.

#### Заключение

В результате исследований выявлена возможность повышения эффективности УЗ коагуляции в резонансном слое с созданием вихревых потоков, предложен но-

вый способ очистки газов от дисперсных частиц размером менее 2,5 мкм за счет увеличения времени УЗ воздействия на каждую частичку и создания зон локального увеличения концентрации тонкодисперсных и субмикронных частиц. Это обеспечивается путем формирования вихревых потоков между излучающей и отражающей поверхностями. Локальная зона повышенной концентрации частиц формируется в периферийной области вихря за счет дрейфа частиц под действием центробежных сил из центральной области вихря к его периферии. При этом излучающая поверхность выполняется в виде изгибно-колеблющегося диска.

В результате исследований установлено, что воздействие в режиме плоской стоячей волны, формируемой излучателем поршневого типа, обеспечивает предельное значение эффективности ультразвуковой коагуляции при уровне звукового давления 160 дБ, равное 83 %.

Показано, что для увеличения эффективности коагуляции необходимо создавать неоднородные ультразвуковые поля, способствующие формированию акустических течений вихревого типа. Экспериментально установлено, что в наибольшей степени вихревые потоки проявляются на расстояниях 7 мм ( $\lambda/2$ ) и 14 мм ( $\lambda$ ). При больших расстояниях значительное влияние вихревых акустических потоков на эффективность коагуляции отсутствует.

Сравнение эффективности коагуляции, обеспечиваемой поршневым и дисковым излучателями показало, что:

- при одинаковом уровне звукового давления, создаваемом излучателями обоих типов, дисковый излучатель обеспечивает более высокую эффективность коагуляции ( $\delta=96$  %), чем излучатель поршневого типа ( $\delta=83$  %) в газовом промежутке, равном одной длине волны УЗ колебаний в воздухе. Именно на таком расстоянии вихревые потоки проявляются наиболее сильно;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 386 с.
2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. – Пенза.: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
3. Numerical investigation of PM2.5 size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement / F. Fan, S. Zhang, W. Wang, J. Yan, M. Su // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – V. 125. – P. 197–206.
4. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) system / Bing Feng Ng, Jin Wen Xiong, Man Pun Wan // *PLOS ONE*. – 2017. – V.12. – P. 1–26.
5. Оборудование для очистки газов от промышленных печей / С.А. Козлова, И.М. Шалаев, О.В. Рева, А.В. Киселев. – Красноярск: СФУ, 2007. – 156 с.
6. Ладыгичев М.Г., Бернер Г.Я. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 696 с.
7. Ультразвук. Газоочистка / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2018. – 534 с.
8. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 224 с.
9. формирование вихревых акустических потоков позволяет понизить (до 150 дБ) уровень звукового давления, необходимый для обеспечения максимальной эффективности коагуляции.
10. формирование вихревых акустических течений наиболее целесообразно для аэрозолей малых концентраций. Так, для концентрации  $18 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>3</sup> прирост эффективности, обеспечиваемый вихревыми потоками, составляет до 50 %. При высоких концентрациях воздействие ультразвуковыми источниками, формирующими вихревые потоки, рационально использовать на заключительной стадии процесса коагуляции, когда за счет воздействия ультразвуковых колебаний происходит снижение концентрации частиц, приводящее к квадратичному уменьшению вероятности агломерации частиц, а как следствие, и эффективности ультразвуковой коагуляции.

Для практической реализации предложенного способа ультразвуковой коагуляции создано устройство, обеспечивающее формирование вихревых потоков за счет УЗ колебаний в резонансном промежутке и пригодное для практической реализации при создании устройств газоочистки от субмикронных загрязняющих частиц.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности ультразвуковой коагуляции более крупных частиц микронного диапазона (5 мкм и более), поскольку такие частицы также будут вовлекаться в вихревое движение, а за счет большей массы такие частицы будут быстрее дрейфовать в направлении периферийной области вихря. Таким образом, для более крупных частиц вероятность столкновения, а, следовательно, и коагуляции под действием УЗ колебаний будет не ниже установленной в проведенных экспериментах.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00121).*

9. Ткаченко Л.А. Динамика аэрозолей в акустическом волновом поле в трубе // Актуальные проблемы механики сплошной среды. – Казань: Институт механики и машиностроения Казанского НЦ РАН, 2016. – С. 100–114.
10. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly / J. Holonen, T. Lanki, T. Yli-Tuomi, P. Tiittanen, V. Kulmala, J. Pekkanen // *American Journal of Epidemiology*. – 2009. – V. 20. – P. 143–153.
11. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator / R.R. Andres, V.M. Acosta, M. Lucas, E. Riera // *Ultrasonic*. – 2018. – V. 82. – P. 345–356.
12. Экспериментальное исследование процесса ультразвуковой коагуляции аэрозолей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Боченков, В.А. Нестеров // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2019): Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2019. – С. 243–248.
13. Experimental stand for the research of the process of ultrasonic coagulation of aerosols / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.S. Bochenkov, V.A. Nesterov, S.A. Terentiev, S.S. Zorin // 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2019: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2019. – P. 221–226.



14. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed system / V.N. Khmelev, V.A. Nesterov, A.V. Shalunov, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok // Journal of Physics: Conference Series. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020. – V. 1679 (1). – P. 022008 (1–8). DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022008
15. Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing / J.A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez, V. Acosta, E. Riera // Ultrasonic Sonochemistry. – 2010. – V. 17. – P. 954–964.
16. Gallego-Juarez A., Rodriguez-Corral G., Gaete-Garretón L. An ultrasonic transducer for high power applications in gases // Ultrasonic – 1998. – V. 16 (6). – P. 267–271.
17. Advances in the development of power ultrasonic technologies based on the stepped plate transducers / J.A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez, E. Riera, V.M. Acosta, F. Montoya, A. Blanco // 36th Annual Symposium. – Teddington, Middlesex, England, 2007. – P. 1–37.
18. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts / E. Riera-Franco de Sarabia, L. Elvira-Segura, I. Gonzalez-Gomez, J.J. Rodriguez-Maroto, R. Munoz-Bueno, J.L. Dorronsoro-Areal // Ultrasonic. – 2003. – V. 41. – P. 277–281.
19. Frequency comparative study of coal-fired fly ash acoustic agglomeration / J. Liu, J. Wang, G. Zhang, J. Zhou, K. Cen // Journal of environmental science. – 2011. – V. 23 (11). – P. 1845–1851.

Поступила 22.09.2021 г.

#### Информация об авторах

**Хмелев В.Н.**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института (филиал) Алтайского государственного технического университета им И.И. Ползунова.

**Шалунов А.В.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института (филиал) Алтайского государственного технического университета им И.И. Ползунова.

**Боченков А.С.**, аспирант Бийского технологического института (филиал) Алтайского государственного технического университета им И.И. Ползунова.

**Нестеров В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института (филиал) Алтайского государственного технического университета им И.И. Ползунова.

UDC 681.2:681.722:534.838.7

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A NEW METHOD OF GAS CLEANING FROM PARTICLES LESS THAN 2.5 MICRON IN SIZE

**Vladimir N. Khmelev<sup>1</sup>,**  
vnh@bti.secna.ru

**Andrey V. Shalunov<sup>1</sup>,**  
shalunov@bti.secna.ru

**Alexander S. Bochenkov<sup>1</sup>,**  
sanya.bochankov@mail.ru

**Viktor A. Nesterov<sup>1</sup>,**  
nva@u-sonic.ru

<sup>1</sup> Biysk Technological Institute (branch) of Altay State Technical University named after I.I. Polzunov, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russia.

*The relevance of the research is caused by the lack of effective methods and means of combating atmospheric pollution with particles less than 2,5 microns in size. The ultrasonic effect used for these purposes does not allow ensuring the degree of coarsening of dispersed particles sufficient for their sedimentation or capture by the existing gas cleaning equipment. Experimental studies show that even at the maximum sound pressure level (above which the reverse process – the dispersion of drops or the destruction of particle agglomerates – is initiated), the efficiency of ultrasonic coagulation is insufficient, especially at a low counting concentration of particles. This necessitates the identification of new physical effects and the development of new methods of ultrasonic exposure, providing an increase in the efficiency of coagulation of fine particles.*

*The main aim: development of a method for increasing the efficiency of ultrasonic coagulation of particles less than 2,5 microns in size due to emerging vortex acoustic flows in a thin air gap between the emitter and the reflector and a device for its implementation.*

*Results. The authors have proposed a new method and device for cleaning gases from dispersed particles less than 2,5 microns in size by increasing the time of ultrasonic action on each particle and creating zones of local increase in the concentration of fine and submicron particles. This is provided by the formation of vortex flows between the emitting (in the form of a flexural-vibrating disk) and the reflecting surfaces. A local zone of increased concentration of particles is formed in the peripheral region of the vortex, due to the drift of particles under the action of centrifugal particles from the central region of the vortex to its periphery. The proposed method provides the increase in efficiency from 13 to 50 %, depending on the initial concentration of dispersed particles.*

### Key words:

*Ultrasonic, ultrasonic coagulation, radiator, vortex flows, aerosol.*

*The research was funded with the grant of the Russian Science Foundation (project no. 19-19-00121).*

### REFERENCES

1. Uzhov V.N., Valdborg A.Yu., Myagkov B.I., Reshidov I.K. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli* [Cleaning industrial gases from dust]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 386 p.
2. Vetoshkin A.G. *Protsessy i apparaty pyleoohistki* [Dust cleaning processes and devices]. Penza, Penza State University Publ. House, 2005. 210 p.
3. Fan F., Zhang S., Wang W., Yan J., Su M. Numerical investigation of PM<sub>2.5</sub> size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, vol. 10, pp. 614–628.
4. Bing Feng Ng, Jin Wen Xiong, Man Pun Wan. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) system. *PLOS ONE*, 2017, vol. 12, pp. 1–26.
5. Kozlova S.A., Shalaev I.M., Reva O.V., Kiselev A.V. *Oborudovanie dlya ochistki gazov ot promyshlennykh pechey* [Equipment for cleaning gases from industrial furnaces]. Krasnoyarsk, SFU, 2007. 156 p.
6. Ladygichev M.G., Berner G.Ya. *Zarubezhnoe i otechestvennoe oborudovanie dlya ochistki gazov. Spravochnoe izdaniye* [Foreign and domestic gas purification equipment. Reference edition]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2004. 696 p.
7. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A. *Ul'trazvuk. Gazoochistka* [Ultrasound. Gas cleaning]. Biysk, Altay State Technical University Publ. House, 2018. 534 p.
8. Timoshenko V.I., Chernov N.N. *Osazhdenie i osadkonakoplenie promyshlennykh dymov* [Deposit and Sedimentation of Industrial Fumes]. Rostov-on-Don, Rostizdat Publ., 2004. 224 p.
9. Tkachenko L.A. *Dinamika aerorozley v akusticheskom volnovom pole v trube* [Dynamic of aerosols in the acoustic wave field in the tube]. *Aktualnye problem mekhaniki sploshnoy sredy* [Actual problems of continuum mechanics]. Kazan, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2016. pp. 100–114.
10. Holonen J., Lanki T., Yli-Tuomi T., Tiittanen P., Kulmala V., Pekkanen J. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 2009, vol. 20, pp. 143–153.
11. Andres R.R., Acosta V.M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonic*, 2018, vol. 82, pp. 345–356.
12. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Bochenkov A.V., Nesterov V.A. *Ekspirimentalnoe issledovanie protsesssa ultrazvukovoy koagulyatsii aerorozley* [Experimental study of ultrasonic coagulation of aerosols]. *Izmereniya, avtomatizatsiya i modelirovanie v promyshlennosti i nauchnykh issledovaniyakh. Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiyem* [Measurements, automation and modeling in industry and scientific research. Materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates

- and Young Scientists with International Participation]. Biysk, Altai State Technical University, 2019. pp. 243–248.
13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Bochenkov A.S., Nesterov V.A., Terentiev S.A., Zorin S.S. Experimental stand for the research of the process of ultrasonic coagulation of aerosols. *20<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2019: Conference Proceedings*. Novosibirsk, NSTU, 2019. pp. 221–226.
  14. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1679 (1), pp. 022008 (1–8).
  15. Gallego-Juarez J.A., Rodriguez G., Acosta V., Riera E. Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2010, vol. 17, pp. 954–964.
  16. Gallego-Juarez A., Rpdroquez-Corral G., Gaete-Garretón L. An ultrasonic transducer for high power applications in gases. *Ultrasonic*, 1998, vol. 16 (6), pp. 267–271.
  17. Gallego-Juarez J.A., Rodriguez G., Riera E., Acosta V.M., Montoya F., Blanco A. Advances in the development of power ultrasonic technologies based on the stepped plate transducers. *36<sup>th</sup> Annual Symposium*. Teddington, Middlesex, England, 2007. pp. 1–37.
  18. Riera-Franco de Sarabia E., Elvira-Segura L., Gonzalez-Gomez I., Rodrigues-Maroto J.J., Munoz-Bueno R., Dorronsoro-Areal J.L. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts. *Ultrasonic*, 2003, vol. 41, pp. 277–281.
  19. Liu J., Wang J., Zhang G., Zhou J., Cen K. Frequency comparative study of coal-fired fly ash acoustic agglomeration. *Journal of environmental science*, 2011, vol. 23 (11), pp. 1845–1851.

Received: 22 September 2021.

#### Information about the authors

**Vladimir N. Khmelev**, Dr. Sc., professor, deputy director for academic affairs, Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov.

**Andrey V. Shalunov**, Dr. Sc., head of the department, Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov.

**Alexander S. Bochenkov**, postgraduate student, Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov.

**Viktor A. Nesterov**, Cand. Sc., associate professor, Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov.

УДК 622.276

## ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Мартюшев Дмитрий Александрович<sup>1</sup>,  
martyushevd@inbox.ru

Пономарева Инна Николаевна<sup>1</sup>,  
permpolitech@gmail.com

Захаров Лев Андреевич<sup>2</sup>,  
lzakharov-ng@mail.ru

Шадров Тимур Артурович<sup>3</sup>,  
shadrov.timur@yandex.ru

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

<sup>2</sup> Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, Россия, 614000, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

<sup>3</sup> ООО «Диджитал фьюче системс», Россия, 614066, г. Пермь, шоссе Космонавтов, 111.

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что появление искусственного интеллекта в нефтяной промышленности привело к увеличению его использования при разведке, разработке, добыче, проектировании месторождений и планировании управления, чтобы ускорить принятие решений, сократить затраты и время. Машинное обучение приобрело большую популярность в установлении взаимосвязи между сложными нелинейными наборами данных и продемонстрировало свое превосходство над методами регрессии в нефтяной инженерии с точки зрения ошибок прогнозирования данных большой размерности, вычислительной мощности и памяти. В представленной статье рассматривается применение машинного обучения для оценки его эффективности и потенциала для определения и прогнозирования значений пластового давления при разработке нефтяных месторождений по сравнению с обычными статистическими моделями нефтегазовой инженерии.

**Цель:** оценка возможностей расчета и прогнозирования пластового давления методом машинного обучения «случайный лес».

**Объект:** динамика пластового давления при разработке терригенных отложений нефтяных месторождений Пермского края.

**Методы:** методы вероятностно-статистического анализа и машинного обучения «random forest regression» («случайный регрессионный лес»).

**Результаты.** Предлагается новый метод прогнозирования пластового давления с использованием машинного обучения, основанный на непараметрической многомерной модели, связывающей показатели эксплуатации скважины во времени. Предлагаемый метод учитывает динамику показателей, характеризующих эксплуатацию скважин, а прогнозируемое пластовое давление хорошо коррелируется с измеренными с помощью гидродинамических исследований скважин значениями. Установлено, что метод машинного обучения «случайный лес» обеспечивает лучшую достоверность прогнозирования пластового давления, чем метод линейной регрессии. Перспективами дальнейшего развития является дополнительное «обучение» модели «случайного леса» и оценка возможности применения других методов машинного обучения для решения поставленной задачи, в том числе расширение набора факторов для более точного моделирования пластового давления.

### Ключевые слова:

Искусственный интеллект, машинное обучение, многомерная модель, случайный лес, показатели эксплуатации скважин, текущее пластовое давление, корреляция.

### Введение

На сегодняшний день большинство нефтяных месторождений России и Пермского края находятся на поздних стадиях разработки. Данные месторождения требуют оперативного контроля параметров разработки и проведения большого количества исследований продуктивных пластов [1]. Одним из важнейших показателей разработки является пластовое давление, которое в основном определяется в результате проведения гидродинамических исследований скважин (ГДИС). Точный прогноз пластового давления имеет широкое применение в нефтяной промышленности, особенно при оптимизации непрерывной добычи на месторождении, количественной оценке продуктив-

ности коллектора, корректировке стоимости добычи нефти и оценке ремонтных работ [2]. Контроль за его величиной – важнейшая задача эффективного мониторинга разработки нефтяных месторождений. Методы ГДИС являются основными в практике нефтепромыслового дела, их применение с целью контроля за энергетическим состоянием залежи в зонах дренирования скважин предписывается руководящими документами. Основным недостатком является необходимость остановки скважины, в ряде случаев на весьма продолжительное время, что приводит к так называемым недоборам добычи нефти. Кроме этого, представляется достаточно сложным выполнять сравнения пластовых давлений между собой во всех скважинах

ввиду одновременности проведения исследований, поскольку одновременно остановить весь фонд в условиях промысла невозможно [3].

В условиях современной нефтедобычи актуальной задачей является широкое применение цифровых технологий для решения различных проблем нефтегазового производства [4]. Их решение осложняет необходимость учета влияния геолого-технологических показателей на процесс разработки нефтяных и газовых месторождений. Стоит отметить, что даже хорошо изученные объекты разработки характеризуются значительной степенью неоднородности параметров пласта и технологических показателей, что значительно усложняет использование цифровых технологий для решения актуальных проблем нефтегазового производства [5]. В этой связи представляется актуальным исследование применимости методов вероятностно-статистического анализа и машинного обучения к решению данных проблем.

Появление искусственного интеллекта в нефтяной промышленности привело к увеличению его использования при разведке, разработке, добыче, проектировании месторождений и планировании управления, чтобы ускорить принятие решений, сократить затраты и время. Машинное обучение приобрело большую популярность в установлении взаимосвязи между сложными нелинейными наборами данных. Этот тип алгоритма машинного обучения продемонстрировал свое превосходство над методами регрессии в нефтяной инженерии с точки зрения ошибок прогнозирования данных большой размерности, вычислительной мощности и памяти [6, 7]. Это приводит к более быстрому принятию решений, что неизменно помогает сэкономить деньги, время и оборудование. Усовершенствованный и улучшенный процесс определения характеристик коллектора требует высокого уровня точности, устойчивого к любым ожидаемым или неожиданным изменениям, чтобы снизить потери с точки зрения человеко-часов и инвестиций [8].

Методы машинного обучения получают все большее применение в различных отраслях, в том числе и в нефтегазовой [9–15]. Все нефтедобывающие компании мира обрабатывают большой объем цифровой информации и темпы роста объема данных повышаются с каждым годом. Качество их обработки и интерпретации является основой принятия эффективных проектных и управленческих решений. В этой связи адаптация методов машинного обучения к нефтегазовой сфере с целью создания автоматизированных систем по контролю параметров эксплуатации нефтяных месторождений имеет большой потенциал [16–22].

Так, например, в компании ООО «Газпромнефть НТЦ» используют технологии машинного обучения для выявления причин сбоев в работе электроцентробежных насосов, а также выделяют для себя несколько приоритетных направлений с применением данных методов – поиск объектов-аналогов, восстановление исторических эксплуатационных данных, обработка данных исследований в режиме реального времени и др. Благодаря внедренной технологии компании уда-

лось снизить эксплуатационные затраты на 2 млн долл. [13].

На сегодняшний день накоплен значительный опыт по разработке нефтяных месторождений Пермского края, имеется обширная база результатов гидродинамических исследований и технологических показателей эксплуатации скважин, что позволяет исследовать применение цифровых технологий для решения различных производственных задач. При формировании большого количества технологической информации представляется возможным использование методов, основанных на сборе, систематизации, обработке и интерпретации данных, представленных в виде цифровых массивов.

В работе [23] описан подход, основанный на построении многоуровневых вероятностно-статистических моделей прогнозирования пластового давления. Использование разработанных многомерных математических моделей позволяет определить пластовое давление в любой период эксплуатации скважин без их остановки на исследование. Стоит отметить, что представленные модели не следует рассматривать в качестве альтернативы гидродинамическим исследованиям. Их применение целесообразно для экспресс-оценки пластового давления либо при невозможности остановки скважины на исследование по технологическим причинам.

Данная методика является наиболее достоверной и адаптированной из известных и поэтому представляется возможным ее применение и на других месторождениях Пермского края (России и мира), а также, учитывая опыт ее применения, исследование методов машинного обучения для определения значений пластового давления в режиме реального времени и для воспроизведения исторической работы скважин.

Принципиально же задачи, решаемые с помощью методов машинного обучения, можно разделить на следующие виды:

- 1) регрессия – предсказание конкретного числа на основе массива признаков или характеристик [24, 25];
- 2) классификация – определение по количеству и качеству признаков или характеристик категории объекта исследования [26];
- 3) кластеризация – объединение объектов в группы по общему признаку [27];
- 4) уменьшение размерности – сжатие массива характеристик объекта до меньшего количества признаков [28, 29].

Приведенные задачи повсеместно встречаются при анализе систем разработки нефтяных и газовых месторождений, его неотъемлемой частью является контроль за энергетическим состоянием объекта разработки, в ходе которого определяется параметр пластового давления. Для определения данного параметра на нефтяных месторождениях Пермского края описанные подходы ранее не использовались, в связи с чем актуально исследовать их применимость и оценить дальнейшие перспективы их применения и развития.

**Исходные данные для оценки  
и прогнозирования пластового давления**

В качестве объекта исследования выбрано одно из перспективных нефтяных месторождений Пермского края (объект Бб). Исходные данные для построения моделей использованы с трех других нефтяных месторождений (объекты Бб) Пермского края, которые характеризуются значительным жизненным циклом эксплуатации и объемом промысловой информации. Данные месторождения являются хорошо изученными и имеют достаточное количество фактических замеров пластового давления. Основные сведения о разработке данных месторождений приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные сведения о нефтяных месторождениях, использованные для построения исходных моделей

**Table 1.** Basic information about oil fields used to build the original models

Параметр Parameter	Месторождение/Field		
	1	2	3
Количество скважин Number of wells	112	48	68
Количество ГДИ Number of wells tests	349	212	231
Начальное пластовое давление, МПа Initial reservoir pressure, MPa	21,2	23,4	22,5
Текущее пластовое давление, МПа Current reservoir pressure, MPa	11,1	9,5	7,2

Объяснение моделей машинного обучения всегда является важной темой исследований [30]. Простые модели машинного обучения, такие как линейная регрессия и деревья решений, легко понять и объяснить. Для линейной регрессии вклад каждой переменной определяется знаком и величиной ее коэффициента. Деревья решений можно интерпретировать путем визуализации внутренних узлов и ветвей. Однако сложные методы нелинейного машинного обучения, такие как опорная векторная регрессия, «случайные леса» и глубокие нейронные сети, трудны для понимания, даже если они всегда обеспечивают более высокую достоверность, чем более простые методы машинного обучения.

Для оценки и прогнозирования пластового давления использованы два метода: множественная линейная регрессия и «random forest regression» («случайный регрессионный лес»). Метод машинного обучения «случайный лес» получил широкое применение во многих сферах и отлично подходит для решения различного рода задач [10, 26]. Данный алгоритм машинного обучения впервые предложен американскими математиками Лео Брайманом и Адель Катлер и является одним из немногих универсальных алгоритмов. Его универсальность заключается в том, что он подходит для решения задач классификации, регрессии, кластеризации, поиска аномалий и т. д. Принципиально «случайный регрессионный лес» – это множество деревьев решений, в которых при решении задачи регрессии их ответы усредняются, что подходит для расчета параметра пластового давления.

Модель «случайного леса» описывается следующими характеристиками:

- количество решающих деревьев – от данного фактора зависит качество результата, однако при увеличении числа деревьев время настройки и работа модели также увеличиваются;
- максимальная глубина решающего дерева в модели – при увеличении данного фактора возрастает качество обучения, однако стоит учитывать, что при решении задач с большим количеством шумовых данных (выбросов) рекомендуется использовать неглубокие деревья;
- максимальное количество узлов решающего дерева (ширина) – при определении данного параметра необходимо учитывать, что он может привести к переобучению модели при небольшой глубине самого дерева;
- максимальное число признаков одного решающего дерева – при увеличении данного фактора время построения леса возрастает, а деревья становятся однообразными, для задач регрессии по умолчанию он равен  $n/3$ , где  $n$  – число деревьев.

Данные характеристики адаптированы под решение задач воспроизведения и прогнозирования значений пластового давления.

**Прогнозирование пластового давления  
с помощью методов машинного обучения**

На первом этапе необходима предобработка и структуризация промысловых данных (дебит жидкости; коэффициент эксплуатации; забойное давление; начальное пластовое давление). Создана программа для ЭВМ «Squage» с целью автоматизации анализа промысловых данных и построения математических моделей, в основу алгоритмов которых легли вышеописанные методы.

Используя вероятностно-статистическую модель множественной линейной регрессии и метод машинного обучения «случайный регрессионный лес» воспроизведены исторические замеры пластового давления с целью проверки достоверности разработанных моделей.

Уравнение множественной линейной регрессии получено методом наименьших квадратов и имеет следующий вид:

$$P_{пл(t)} = 0,7548P_{пл(t-1)} + 0,0131 \frac{(Q_{ж(t)} - Q_{ж(t-1)})}{Q_{ж(t)}} + 0,207P_{заб(t)} - 0,00001T + 1,2851,$$

где  $P_{пл(t)}$  – прогнозируемое пластовое давление;  $P_{пл(t-1)}$  – пластовое давление, предшествующее прогнозу;  $\frac{(Q_{ж(t)} - Q_{ж(t-1)})}{Q_{ж(t)}}$  – темп роста дебита жидкости (далее  $T_q$ ) относительно предыдущего ГДИ;  $Q_{ж(t)}$  – дебит жидкости в сутки в среднем за сяц;  $P_{заб(t)}$  – забойное давление на текущую дату;  $T$  – время эксплуатации скважины.

В ходе проверки значимости коэффициентов уравнения линейной регрессии получены следующие результаты с помощью  $p$ -критерия (табл. 2).

**Таблица 2.** Значимость коэффициентов уравнения линейной регрессии

**Table 2.** Significance of the coefficients of the linear regression equation

Параметр/Parameter	p-критерий/p-criterion
Свободный член/Free member	0,000*
$P_{пл(t-1)}$	0,000*
$T_q$	0,005*
$P_{заб(t)}$	0,000*
$T$	0,000*

Примечание/Note: \* – признак значимости/sign of significance.

В результате расчетов вычислено среднее абсолютное отклонение модели на входных данных, которое составило 0,821 МПа, при  $R^2=0,757$ .

Для построения модели «случайный регрессионный лес» использовались следующие параметры:

- количество деревьев – 200;
- максимальная глубина – 5;
- максимальное число признаков одним деревом – 3.

После обучения модели «случайного леса» рассчитаны коэффициенты значимости факторов. Значимость фактора в «случайном лесе» определяется его совокупной важностью для каждого решающего дерева, т. е. мерой уменьшения разнородности Джини (табл. 3).

Среднее абсолютное отклонение на входных данных модели «случайного леса» составило 0,812 МПа.

Для вышеописанных методов оценивались рабочие характеристики моделей при помощи подхода

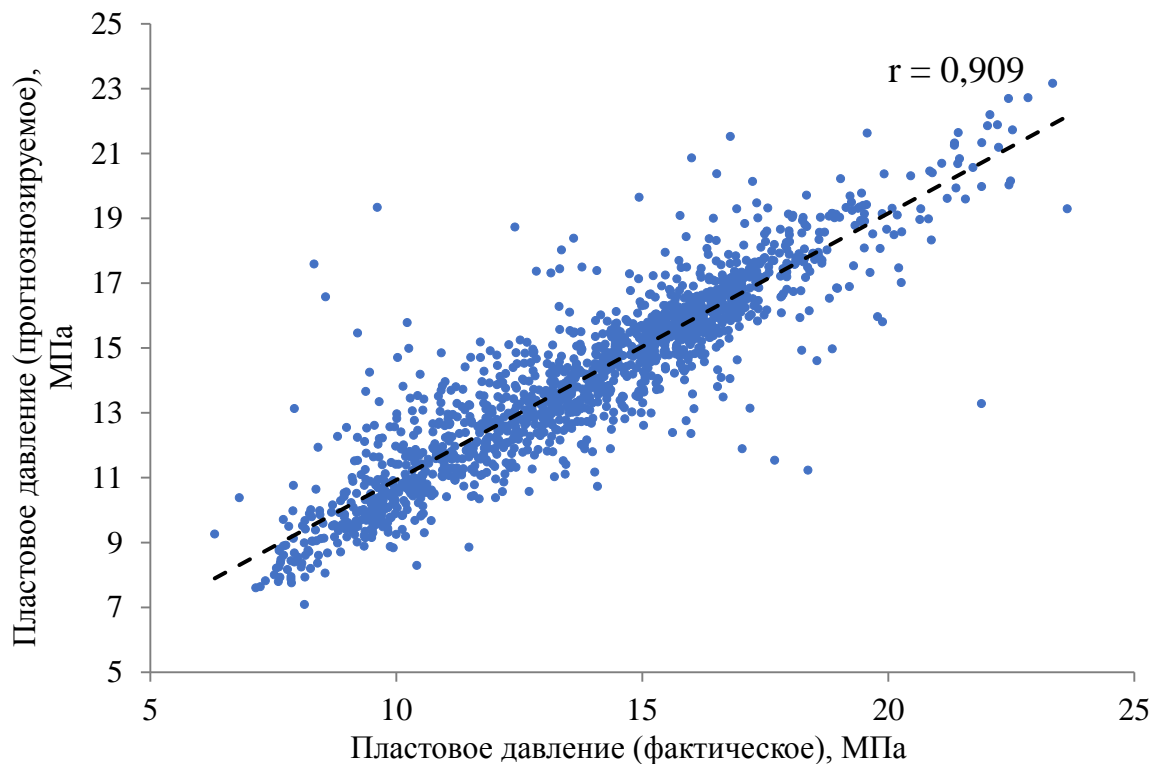
перекрестной проверки («кросс-валидация»). Данная процедура подразумевает разделение выборки на равные части, далее каждая из частей выборки последовательно исключается (отложенная выборка) и строится модель на оставшихся данных, а на отложенной части проверяется величина ошибки. В результате данной проверки стандартное отклонение для модели линейной регрессии составило  $1,071 \pm 0,14$  МПа, а для модели «случайного леса» –  $1,018 \pm 0,17$  МПа. Данные величины указывают на стабильность моделей, что означает хорошую вероятность получения достоверного результата в случае, если ни одна из моделей ранее не «обучалась» на вводимых исходных данных.

**Таблица 3.** Важность факторов модели «случайного леса»

**Table 3.** Importance of factors in the «random forest» model

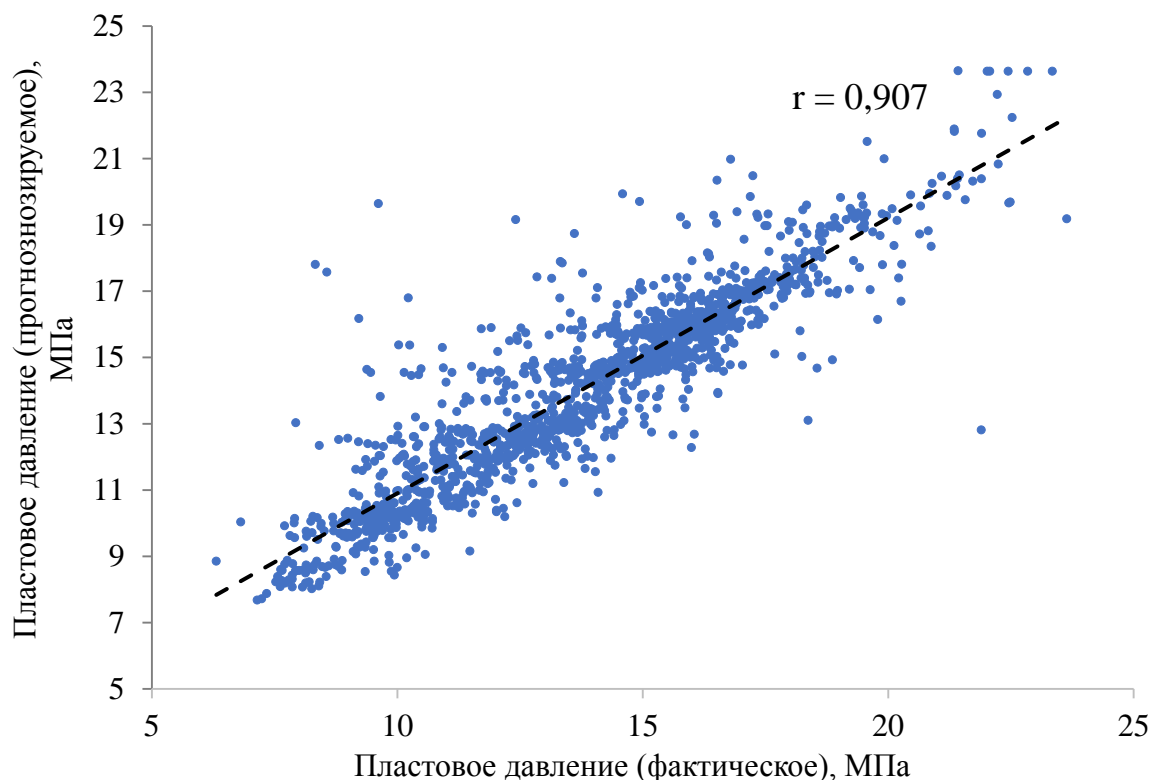
Фактор Factor	Коэффициент значимости Significance coefficient
$P_{пл(t-1)}$	0,815158
$T_q$	0,023523
$P_{заб(t)}$	0,132228
$T$	0,029091

Для оценки достоверности метода линейной регрессии и метода «случайный лес» построены зависимости фактических (1553 измерения) и рассчитанных замеров пластового давления (рис. 1, 2).



**Рис. 1.** Поле корреляции между фактическими и рассчитанными значениями пластового давления методом линейной регрессии

**Fig. 1.** Correlation field between actual and calculated values of reservoir pressure by linear regression method



**Рис. 2.** Поле корреляции между фактическими и рассчитанными значениями пластового давления методом «случайного леса»

**Fig. 2.** Correlation field between the actual and calculated values of reservoir pressure by the «random forest» method

Анализируя представленные графики, можно сделать вывод, что в обоих случаях рассчитанные параметры пластового давления имеют «плотное» распределение с фактическими замерами, что говорит о хорошей сходимости результатов в целом по объекту исследования. Отклонения, полученные в результате применения методов линейной регрессии и «случайного леса» по всей исследуемой выборке, представлены в табл. 4.

**Таблица 4.** Отклонения в результате применения методов линейной регрессии и «случайного леса»

**Table 4.** Deviations due to linear regression and «random forest» method

Метод Method	Абсолютное отклонение от фактического измерения (среднее), МПа Absolute deviation from the actual measurement (average), MPa	Относительное отклонение от фактического измерения (среднее), % Relative deviation from the actual measurement (average), %
Линейная регрессия Linear regression	0,87	6,9
«Случайный лес» «Random forest»	0,86	6,8

Таким образом, можно отметить, что методы линейной регрессии и «случайного леса» имеют равное минимальное отклонение прогнозируемых значений пластового давления от фактических, что указывает

на эффективность и перспективность использования данных методов.

Учитывая «неоднородность» выборки и большой объем данных, необходимо провести поскважинное сопоставление результатов. С этой целью построены графики сопоставления результатов фактических и расчетных значений пластового давления (рис. 3–5). Выбор скважин для демонстрации полученных данных произведен таким образом, чтобы отразить наиболее полную картину применимости используемых методов.

Анализируя представленные графики сопоставления фактических и рассчитанных значений пластового давления, можно сделать вывод, что оба метода показывают хорошую сходимость с историческими данными при решении задачи воспроизведения «падающей» динамики исследуемого параметра. Однако в некоторых случаях метод «случайного леса» показывает лучшую сходимость. Так, например, на скв. 256 и 116 общий тренд пластового давления данным методом смоделирован ближе к факту. Особое внимание стоит обратить на расчет последнего замера пластового давления, так как он имеет наибольшую значимость при прогнозировании данного параметра. Высокая степень сходимости данной точки позволяет сделать вывод, что математическая модель достоверно отображает текущее энергетическое состояние скважин и объекта разработки. В этом ключе метод «случайного леса» также показывает лучшую сходимость по сравнению с методом линейной регрессией. Однако стоит отметить, что ни один из исследуемых



способов не смог смоделировать резкие перепады пластового давления (рис. 5). В этой связи необходи-

ма доработка методики контроля энергетического состояния залежи с учетом полученного опыта.

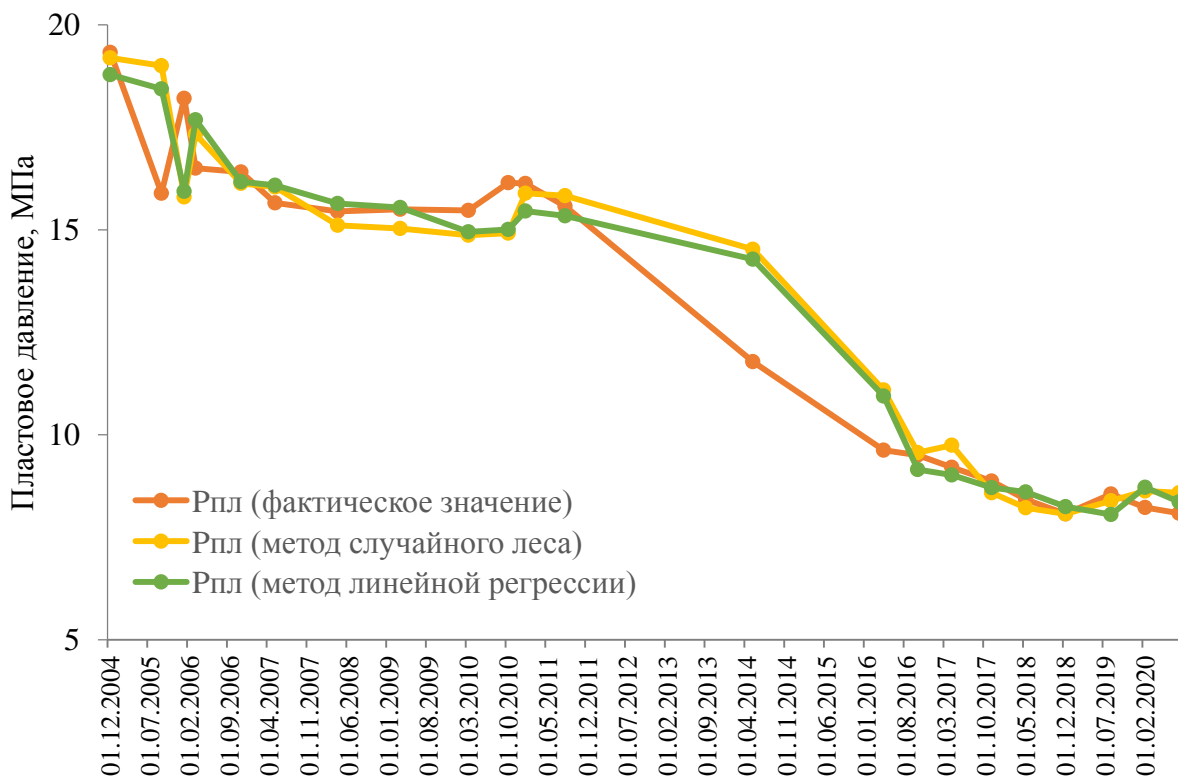


Рис. 3. Сопоставление фактических и рассчитанных значений пластового давления по скв. 256

Fig. 3. Comparison of actual and calculated values of reservoir pressure for well 256

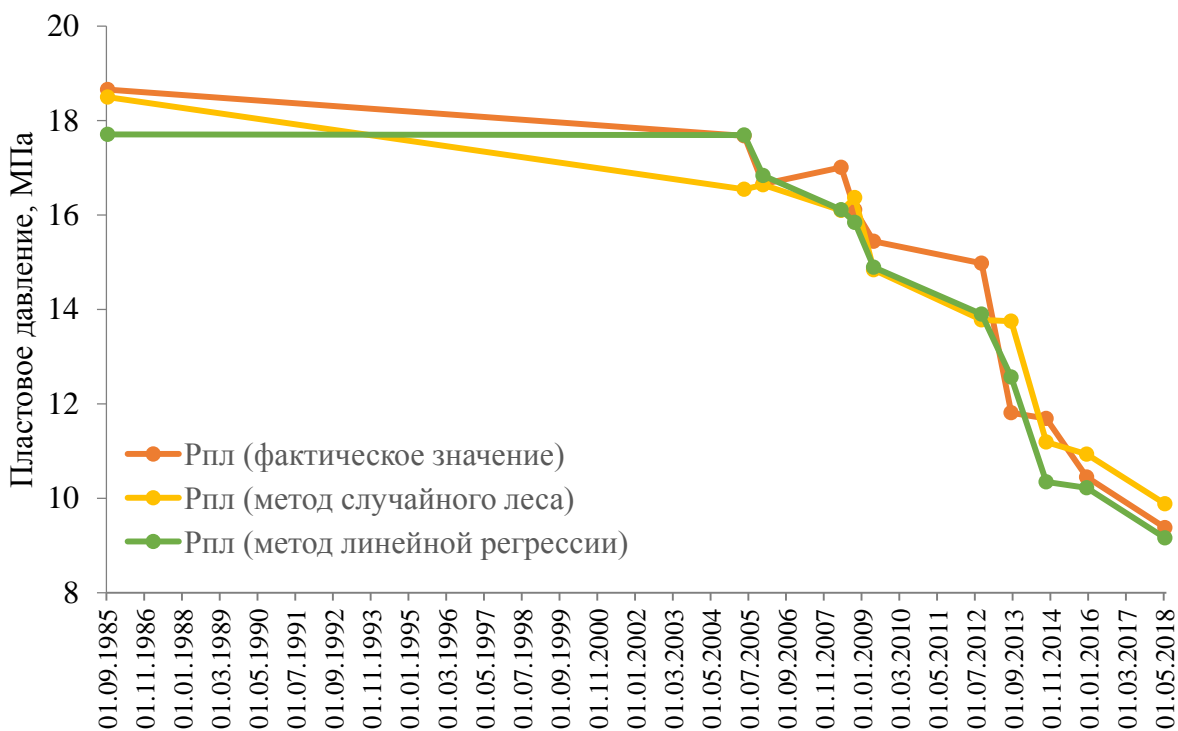


Рис. 4. Сопоставление фактических и рассчитанных значений пластового давления по скв. 116

Fig. 4. Comparison of the actual and calculated values of the reservoir pressure parameter for well 116

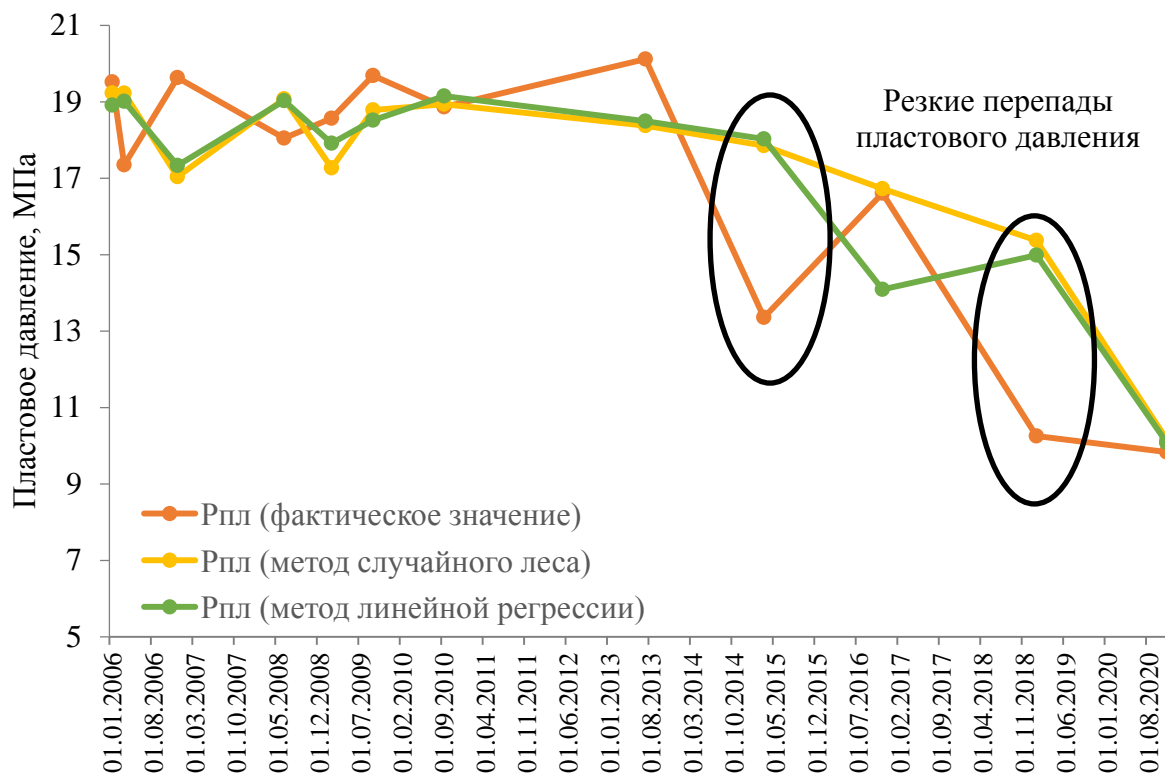


Рис. 5. Сопоставление фактических и рассчитанных значений пластового давления по скв. 45  
 Fig. 5. Comparison of the actual and calculated values of the reservoir pressure parameter for well 45

В общем случае оба метода показали хорошие результаты по воспроизведению фактических значений параметра пластового давления и могут применяться для решения производственных задач с участием эксперта для оценки «выбросов» в получаемых данных. Также необходимо дополнительное «обучение» модели «случайного леса» и оценка возможности применения других методов машинного обучения для решения поставленной задачи, в том числе расширение набора факторов для более точного моделирования пластового давления.

#### Заключение

За прошедшие годы в нефтяной промышленности накопилось слишком много информации, поэтому алгоритмы машинного обучения, которые могут обрабатывать многомерные и сложные данные, являются гораздо более предпочтительными по сравнению с эмпирическими корреляциями и моделями линейной регрессии.

В представленном исследовании предлагается новый метод прогнозирования пластового давления с использованием метода машинного обучения, осно-

ванный на непараметрической многомерной модели, связывающей показатели эксплуатации скважины во времени. Предлагаемый метод учитывает динамику показателей, характеризующих эксплуатацию скважин, а прогнозируемое пластовое давление хорошо коррелируется с измеренными с помощью ГДИ значениями. В исследовании установлено, что метод машинного обучения «случайный лес» обеспечивает лучшую достоверность прогнозирования пластового давления, чем метод линейной регрессии. Кроме того, предлагаемый метод позволяет избежать утомительной процедуры калибровки коэффициентов по сравнению с методами, основанными на параметрических преобразованиях.

На основе рассчитанного значения пластового давления с помощью машинного обучения можно определить режим разработки залежи в данный момент, заблаговременно проектировать систему поддержания пластового давления или оценить ее эффективность, а также обосновано принимать дальнейшие рациональные решения по разработке нефтяных месторождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молчанов А.А., Агеев П.Г. Внедрение новых технологий – надежный путь извлечения остаточных запасов месторождений углеводородов // Записки Горного Института. – 2017. – Т. 227. – С. 530–539.
2. Шамсиев М.Н. Интерпретация результатов термогазодинамических исследований вертикальных газовых скважин, несовершенных по степени вскрытия пласта // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 1. – С. 39–43.
3. Елесин А.В., Кадырова А.Ш., Никифорова А.И. Определение поля проницаемости пласта по замерам давления на скважинах с использованием сплайн-функции // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 102–107.
4. Бобб И.Ф. Международный опыт создания нефтегазовых ИТ-технологий для моделирования месторождений // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 193–196.
5. Белозеров И.П., Губайдуллин М.Г. О концепции технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терриген-

- ных коллекторов на цифровой модели ядра // Записки Горного Института. – 2020. – Т. 244. – С. 402–407.
6. Jamiu Oyekan Adegbite, Hadi Belhaj, Achinta Bera. Investigations on the relationship among the porosity, permeability and pore throat size of transition zone samples in carbonate reservoirs using multiple regression analysis, artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy interface system // Petroleum Research. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.05.005> (дата обращения 15.08.2021).
  7. Ponomareva I.N., Galkin V.I., Martyshev D.A. Operational method for determining bottom hole pressure in mechanized oil producing wells, based on the application of multivariate regression analysis // Petroleum Research. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.05.010> (дата обращения 15.08.2021).
  8. Belhouchet H.E., Benzagouta M.S., Dobbi A., Alquraishic A., Duplay J. A new empirical model for enhancing well log permeability prediction, using nonlinear regression method: Case study from Hassi-Berkine oil field reservoir – Algeria // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 33. – Issue 2. – P. 136-145.
  9. Wong P.M., Jian F.X., Taggart I.J. A critical comparison of neural networks and discriminant analysis in lithofacies, porosity and permeability predictions // Journal Petroleum Geology. – 1995. – V. 18. – P. 191–206.
  10. Nikraves M., Aminzadeh F. Ch. 1. Soft computing for intelligent reservoir characterization and modeling // Developments in Petroleum Science. – 2003. – V. 51. – P. 3–32.
  11. Применение методов искусственного интеллекта для выявления и прогнозирования осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин: проблемы и основные направления решения / А.Д. Черников, Н.А. Еремин, В.Е. Столяр, А.Г. Сбоев, О.К. Семенова-Чащина, Л.К. Фицнер // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 87–96.
  12. Лаломов А.В., Бочнева А.А., Чефранов Р.М. Разработка цифровой системы прогнозирования коренных источников золота по результатам шлихового опробования на примере Вагранского россыпного узла (Северный Урал) // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 2. – С. 67–76.
  13. Евсюткин И.В., Марков Н.Г. Глубокие искусственные нейронные сети для прогноза значений дебитов добывающих скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 88–95.
  14. Применение технологий глубокого обучения для изучения шлифов на примере Усинского месторождения нефти / Н.А. Попов, И.С. Путилов, А.А. Гуляева, Е.Е. Винокуров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 100–112.
  15. Application of supervised machine learning paradigms in the prediction of petroleum reservoir properties: Comparative analysis of ANN and SVM models / D. Asante Otchere, T.O. Arbi Ganata, R. Gholami, S. Ridhaa // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – 108182.
  16. Harpreet Singh. Machine learning for surveillance of fluid leakage from reservoir using only injection rates and bottomhole pressures // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – V. 69. – 102933.
  17. Shahab D. Mohaghegh. Subsurface analytics: contribution of artificial intelligence and machine learning to reservoir engineering, reservoir modeling, and reservoir management // Petroleum Exploration and Development. – 2020. – V. 47. – Iss. 2. – P. 225–228.
  18. A new method of predicting the saturation pressure of oil reservoir and its application / Guoyi Yu, Feng Xu, Yingzhi Cui, Xiangling Li, Chujuan Kang, Cheng Lu, Siyu Li, Lin Bai, Shuheng Du // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – V. 45. – Iss. 55. – P. 30244–30253.
  19. Pattern visualization and understanding of machine learning models for permeability prediction in tight sandstone reservoirs / Guoyin Zhang, Zhizhang Wang, Shahab Mohaghegh, Chengyan Lin, Yanan Sun, Shengjie Pei // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – 108142.
  20. Teixeira A.F., Secchi A.R. Machine learning models to support reservoir production optimization // IFAC-PapersOnLine. – 2019. – V. 52. – Iss. 1. – P. 498–501.
  21. Predicting field production rates for waterflooding using a machine learning-based proxy model / Zhi Zhong, A.Y. Sun, Yanyong Wang, Bo Ren // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 194. – 107574.
  22. Khamehchi E., Bemani A. Prediction of pressure in different two-phase flow conditions: Machine learning applications // Measurement. – 2020. – 108665.
  23. Галкин В.И., Пономарева И.Н., Мартюшев Д.А. Прогноз пластового давления и исследование его поведения при разработке нефтяных месторождений на основе построения многоуровневых многомерных вероятностно-статистических моделей // Георесурсы. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 73–82.
  24. Козырев Н.Д. Оценка влияния параметров неопределенности на прогнозирование показателей разработки / Н.Д. Козырев, А.Ю. Вишняков, И.С. Путилов // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 356–368.
  25. Mohammad Ali Ahmadi, Zhangxing Chen. Comparison of machine learning methods for estimating permeability and porosity of oil reservoirs via petro-physical logs // Petroleum. – 2019. – V. 5. – Iss. 3. – P. 271–284.
  26. Pan Y., Deng L., Lee W.J. A novel data-driven pressure/rate deconvolution algorithm to enhance production data analysis in unconventional reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 192. – 107332.
  27. Anifowose F., Labadina J., Abdurraheem A. Improving the prediction of petroleum reservoir characterization with a stacked generalization ensemble model of support vector machines // Applied Soft Computing. – 2015. – V. 26. – P. 483–496.
  28. Al Khalifah H., Glover P.W.J., Lorinczi P. Permeability prediction and diagenesis in tight carbonates using machine learning techniques // Marine and Petroleum Geology. – 2020. – V. 112. – 104096.
  29. El-Amin M.F., Subasi A. Developing a generalized scaling-law for oil recovery using machine learning techniques // Procedia Computer Science. – 2019. – V. 163. – P. 237–247.
  30. A survey of methods for explaining black box models / R. Guidotti, A. Monreale, S. Ruggieri, F. Turini, F. Giannotti, D. Pedreschi // ACM Computing Surveys. – 2018. – V. 51. – Iss. 5. – P. 1–42.

Поступила 22.09.2021 г.

#### Информация об авторах

**Мартюшев Д.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Пономарева И.Н.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Захаров Л.А.**, инженер отдела создания и мониторинга гидродинамических моделей филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Пермь.

**Шадров Т.А.**, старший аналитик компании ООО «Диджитал фьюче системс».

UDC 622.276

## APPLICATION OF MACHINE LEARNING FOR FORECASTING FORMATION PRESSURE IN OIL FIELD DEVELOPMENT

**Dmitriy A. Martyushev<sup>1</sup>**,  
martyushevdi@inbox.ru

**Inna N. Ponomareva<sup>1</sup>**,  
permpolitech@gmail.com

**Lev A. Zakharov<sup>2</sup>**,  
lzakharov-ng@mail.ru

**Timur A. Shadrov<sup>3</sup>**,  
shadrov.timur@yandex.ru

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

<sup>2</sup> Branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm,  
29, Sovetskoy Armii street, Perm, 614000, Russia.

<sup>3</sup> Digital Futures Systems LLC,  
111, Kosmonavtov street, Perm, 614066, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the fact that the advent of artificial intelligence in the oil industry has led to an increase in its use in exploration, development, production, field design and management planning to speed up decision-making, reduce costs and time. Machine learning has gained immense popularity in correlating complex nonlinear datasets and has demonstrated its superiority over regression methods in petroleum engineering in terms of large data prediction errors, processing power and memory. This article discusses the use of machine learning to assess its effectiveness and potential for determining and predicting reservoir pressure values in oil field development, compared with conventional statistical models of oil and gas engineering.

**The main aim** of the study is to assess the possibilities of calculating and predicting reservoir pressure using the «random forest» machine learning method.

**Object:** dynamics of reservoir pressure during the development of terrigenous deposits of oil fields in the Perm Krai.

**Methods:** methods of probabilistic-statistical analysis and machine learning «random forest regression».

**The results.** The presented study proposes a new method for predicting reservoir pressure using machine learning, based on a nonparametric multidimensional model that links well performance over time. The proposed method takes into account the dynamics of indicators characterizing the operation of wells, and the predicted reservoir pressure is well correlated with the values measured using hydrodynamic studies. It was found that the «random forest» machine learning method provides better performance in terms of reservoir pressure prediction accuracy than the linear regression method. The prospects for further development are additional «training» of the «random forest» model and assessment of the possibility of using other machine learning methods to solve the problem, including expanding the set of factors for more accurate modeling of reservoir pressure.

### Key words:

Artificial Intelligence, machine learning, multidimensional model, random forest, well operation indicators, current reservoir pressure, correlation.

### REFERENCES

1. Molchanov A.A., Ageev P.G. Implementation of new technology is a reliable method of extracting reserves remaining in hydrocarbon deposits. *Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 227, pp. 530–539. In Rus.
2. Shamsiev M.N. The results interpretation of thermogasdynamic studies of vertical gas wells incomplete in terms of the reservoir penetration degree. *Georesursy*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 39–43. In Rus.
3. Elesin A.V., Kadyrova A.S., Nikiforov A.I. Definition of the reservoir permeability field according to pressure measurements on wells with the use of spline function. *Georesursy*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 102–107. In Rus.
4. Bobb I.F. International experience of E&P software solutions development. *Georesursy*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 193–196. In Rus.
5. Belozerov I.P., Gubaidullin M.G. Concept of technology for determining the permeability and porosity properties of terrigenous reservoirs on a digital rock sample model. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 402–407. In Rus.
6. Jamiu Oyekan Adegbite, Hadi Belhaj, Achinta Bera. Investigations on the relationship among the porosity, permeability and pore throat size of transition zone samples in carbonate reservoirs using multiple regression analysis, artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy interface system. *Petroleum Research*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.05.005> (accessed 15 August 2021).
7. Ponomareva I.N., Galkin V.I., Martyushev D.A. Operational method for determining bottom hole pressure in mechanized oil producing wells, based on the application of multivariate regression analysis. *Petroleum Research*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.05.010> (accessed 15 August 2021).
8. Belhouchet H.E., Benzagouta M.S., Dobbi A., Alquraishic A., Duplay J. A new empirical model for enhancing well log permeability prediction, using nonlinear regression method: Case study from Hassi-Berkine oil field reservoir – Algeria. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 2021, vol. 33, Iss. 2, pp. 136–145.

9. Wong P.M., Jian F.X., Taggart I.J. A critical comparison of neural networks and discriminant analysis in lithofacies, porosity and permeability predictions. *Journal Petroleum Geology*, 1995, vol. 18, pp. 191–206.
10. Nikravesh M., Aminzadeh F. Ch. 1. Soft computing for intelligent reservoir characterization and modeling. *Developments in Petroleum Science*, 2003, vol. 51, pp. 3–32.
11. Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E., Sboev A.G., Semenova-Chaschina O.K., Fitsner L.K. Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and solutions. *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 87–96. In Rus.
12. Lalomov A.V., Boneva A.A., Chefranov R.M. The development of numerical forecasting systems of primary sources of gold on the results of placer sampling in the example Vagran placer cluster (North Urals). *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 67–76. In Rus.
13. Evsyutkin I.V., Markov N.G. Deep artificial neural networks for forecasting debit values for production wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 88–95. In Rus.
14. Popov N.A., Putilov I.S., Gulyaeva A.A., Vinokurova E.V. Application of deep learning technologies for studying thin sections on the example of Usinsk oil field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 6, pp. 100–112. In Rus.
15. Asante Otchere D., Arbi Ganata T.O., Gholami R., Ridhaa S. Application of supervised machine learning paradigms in the prediction of petroleum reservoir properties: Comparative analysis of ANN and SVM models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 108182.
16. Harpreet Singh. Machine learning for surveillance of fluid leakage from reservoir using only injection rates and bottomhole pressures. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, vol. 69, 102933.
17. Shahab D. Mohaghegh. Subsurface analytics: contribution of artificial intelligence and machine learning to reservoir engineering, reservoir modeling, and reservoir management. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, vol. 47, Iss. 2, pp. 225–228.
18. Guoyi Yu, Feng Xu, Yingzhi Cui, Xiangling Li, Chujuan Kang, Cheng Lu, Siyu Li, Lin Bai, Shuheng Du. A new method of predicting the saturation pressure of oil reservoir and its application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, Iss. 55, pp. 30244–30253.
19. Guoyin Zhang, Zhizhang Wang, Shahab Mohaghegh, Chengyan Lin, Yanan Sun, Shengjie Pei. Pattern visualization and understanding of machine learning models for permeability prediction in tight sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 108142.
20. Teixeira A.F., Secchi A.R. Machine learning models to support reservoir production optimization, *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, Iss. 1, pp. 498–501.
21. Zhong Zh., Sun A.Y., Wang Y., Ren B. Predicting field production rates for waterflooding using a machine learning-based proxy model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 194, 107574.
22. Khomehchi E., Bemani A. Prediction of pressure in different two-phase flow conditions: machine learning applications. *Measurement*, 2020, 108665.
23. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Martyushev D.A. Prediction of reservoir pressure and study of its behavior in the development of oil fields based on the construction of multilevel multidimensional probabilistic-statistical models. *Georesursy*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 73–82. In Rus.
24. Kozlyev N.D., Vishnyakov A.Yu., Putilov I.S. Assessment of the uncertainty parameters influence on the development indicators forecasting. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 356–368. In Rus.
25. Ali Ahmadi M., Chen Zh. Comparison of machine learning methods for estimating permeability and porosity of oil reservoirs via petrophysical logs. *Petroleum*, 2019, vol. 5, Iss. 3, pp. 271–284.
26. Pan Y., Deng L., Lee W.J. A novel data-driven pressure/rate deconvolution algorithm to enhance production data analysis in unconventional reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 192, 107332.
27. Anifowose F., Labadina J., Abdulraheem A. Improving the prediction of petroleum reservoir characterization with a stacked generalization ensemble model of support vector machines. *Applied Soft Computing*, 2015, vol. 26, pp. 483–496.
28. Al Khalifah H., Glover P.W.J., Lorinczi P. Permeability prediction and diagenesis in tight carbonates using machine learning techniques. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, vol. 112, 104096.
29. El-Amin M.F., Subasi A. Developing a generalized scaling-law for oil recovery using machine learning techniques. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 163, pp. 237–247.
30. Guidotti R., Monreale A., Ruggieri S., Turini F., Giannotti F., Pedreschi D. A survey of methods for explaining black box models. *ACM Computing Surveys*, 2018, vol. 51, Iss. 5, pp. 1–42.

Received: 22 September 2021.

#### Information about the authors

**Dmitriy A. Martyushev**, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Inna N. Ponomareva**, Cand. Sc., professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Lev A. Zakharov**, engineer, branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

**Timur A. Shadrov**, senior analyst, Digital Futures Systems LLC.

УДК 550.424.2:665.6

## ИЗМЕНЕНИЕ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

**Боев Владислав Викторович**<sup>1</sup>,  
v.-3@mail.ru

**Барановская Наталья Владимировна**<sup>2</sup>,  
natalya.baranovs@mail.ru

**Боев Виктор Александрович**<sup>1</sup>,  
vikboev2009@mail.ru

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

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

**Актуальность** исследования обусловлена отсутствием данных по воздействию многих нефтеперерабатывающих заводов на прилегающие почвы для конкретных регионов, определяемому конструктивными и технологическими особенностями, при изученности общей геохимической специфики нефтеперерабатывающей отрасли.

**Цель** исследования состоит в выявлении особенностей накопления в почвах и распределения по профилю некоторых специфических для нефтеперерабатывающей промышленности химических элементов на территории деятельности относительно нового нефтеперерабатывающего завода путем сопоставления с данными для фоновой территории с аналогичными природными условиями и кларком.

**Объекты:** почвы Тюменского федерального заказника и территории расположения Антипинского нефтеперерабатывающего завода.

**Методы:** выбор и подготовка пробных площадок, отбор и подготовка почв, определение элементного состава инструментальным нейтронно-активационным методом, интерпретация результатов.

**Результаты.** Изучено содержание Br, Sb, Zn, As, Co в почвах восточной части Тюменского федерального заказника и района размещения Антипинского нефтеперерабатывающего завода, их распределение по профилю. Путем сравнения полученных результатов выявлено повышенное содержание данных химических элементов в горизонте A1 почв территории расположения Антипинского нефтеперерабатывающего завода относительно Тюменского федерального заказника и изменение закономерностей их распределения по профилю. В почве района вблизи техногенного объекта к низу сокращается повышенное содержание рассмотренных химических элементов, что наблюдается и по абсолютным значениям, и по коэффициентам концентрации относительно условно-фоновых данных для почв Тюменского федерального заказника. Это свидетельствует о поступлении их с поверхности. При этом на обеих территориях содержание химических элементов ниже кларка, что отражает относительно невысокую техногенную нагрузку в данных районах.

### **Ключевые слова:**

Элементный состав почв, Тюменский федеральный заказник, Антипинский нефтеперерабатывающий завод, техногенное воздействие нефтепереработки на почвы, техногенная трансформация почв.

### **Введение**

За время изучения изменения накопления и миграции химических элементов в природных средах под воздействием техногенеза установлена геохимическая специфика различных отраслей промышленности, включая нефтеперерабатывающую. Геоэкологическое значение последней определяется масштабами использования углеводородного сырья. Так, в мире функционирует более 800 нефтеперерабатывающих заводов [1] общей мощностью более 4 трлн т в год. Россия находится на 3 месте по первичной переработке нефти [2]. Здесь функционирует около 40 крупных нефтеперерабатывающих заводов общей мощностью более 280 млн т в год [3].

Установлены различные механизмы поступления загрязняющих веществ от объектов нефтеперерабатывающей промышленности [4–9] и их воздействия на компоненты природной среды [10–20]. Выявлен ряд специфических химических элементов для

нефтеперерабатывающей промышленности: Br, Sb, La, Tb, Yb, Ce, As, Hg, Zn, Co. Однако состав выбросов особенный для каждого нефтеперерабатывающего завода [21]. Это определяется рядом факторов, индивидуальных для каждого объекта, к которым относят технические и технологические характеристики [22]. На НПЗ выбросы разного состава исходят из множества источников с различными параметрами [23]. К тому же большинство исследований влияния нефтеперерабатывающей промышленности на природную среду сосредоточено на специфических для данной отрасли химических веществах вроде углеводородов и некоторых прочих химических соединениях [24].

Поэтому актуально детальное поэлементное изучение выбросов конкретных НПЗ и их распределения в определенных средах.

Загрязняющие вещества распространяются с выбросами от техногенных объектов в природных сре-

дах. Для нефтеперерабатывающей промышленности преобладают атмосферные выбросы. Данная отрасль занимает 4 место по загрязнению атмосферы среди прочих [23]. Причем атмосферные выбросы местных НПЗ составляют 0,45 % перерабатываемого сырья в сравнении с 0,1 % западных предприятий. Поступление загрязняющих веществ в почву из атмосферы происходит путем их осаждения.

Компоненты природных сред обладают различными индикаторными свойствами, под которыми в эколого-геохимическом смысле понимают способность к отражению техногенной нагрузки территории путем накопления специфических химических элементов [25]. Так, почва отражает длительные тенденции техногенного воздействия. Важность изучения техногенного изменения данного компонента природной среды определяется несколькими факторами. Во-первых, сюда поступает значительная часть атмосферных выбросов, а также твердых и жидких компонентов с территорий техногенных объектов. Во-вторых, отсюда загрязняющие вещества усваиваются организмами и разносятся грунтовыми водами, поступая в литосферу и гидросферу. К тому же параметры почв, такие как строение профиля, гранулометрический состав и химические свойства, определяемые их типом, влияют на распространение техногенно поступающих химических элементов по разрезу.

Техногенное воздействие выявляют путем сравнения показателей содержания химических элементов в компонентах природной среды изучаемых территорий со значениями, принятыми за естественные. Последние могут быть представлены нормативными показателями (ПДК, ОДК), кларками, (средними значениями содержания химических элементов в определенном компоненте природной среды) или опытными значениями для фоновых территорий конкретных регионов. Ввиду региональной геохимической специфики наиболее корректной считают оценку техногенного воздействия на основе региональных фоновых данных. Однако в современных масштабах урбанизации и техногенеза затруднителен поиск фоновых территорий. Наиболее соответствующими фоновому статусу объектами считают особо охраняемые территории вроде заповедников и заказников.

#### Материалы и методы

Данная работа основана на сравнении элементного состава разрезов почв техногенной территории с фоновой для выявления изменения содержания и закономерностей распределения химических элементов. Использована территория размещения Антипинского нефтеперерабатывающего завода и участок Тюменского федерального заказника. Возможность применения последнего в качестве фоновой территории была подтверждена ранее [26].

Тюмень находится в зоне умеренно-континентального климата. На исследованных территориях преобладают смешанные, хвойные и лиственные леса с дерново-подзолистыми почвами и урбаноземами.

Антипинский НПЗ расположен на юго-восточной окраине г. Тюмени, где занимает территорию в 200 га.

Предприятие функционирует с 2006 г. Текущая производительность составляет 7,5 млн т в год. Для данного исследования была взята окружающая НПЗ территория радиусом чуть более 2 км. Ее произвольно подразделили по удаленности от объекта на 3 зоны (420–490, 700–1130, 1300–2170 м). Для отбора проб использовалась система концентрических окружностей [27]. С целью изучения специфики верхнего горизонта почвы ее отбирали из прикопок. Помимо этого, для отражения особенностей почвенной толщи, к югу от НПЗ, на наименее затронутой урбанизацией территории, во многом сохранившей естественный ландшафт, было создано три разреза. В Тюменском федеральном заказнике, принятом в данной работе за условно фоновую территорию, почвы отбирали на предварительно размеченной площадке в 0,25 га на основе методических рекомендаций [28]. Для исследования был выбран участок у восточной границы заказника, вблизи поселка Бухтал, на основе ландшафтного критерия в соответствии с условиями района размещения НПЗ. Отбор производился из прикопок (5 по углам и в центре) и разрезов (3 в пределах площадки).

Таким образом, отбор почв на исследованных территориях Тюменской области осуществлялся из разрезов и прикопок на основе методических рекомендаций [29, 30]. Мощность горизонтов приведена в табл. 1.

**Таблица 1.** Строение профиля почв территории Тюменского федерального заказника и района расположения Антипинского нефтеперерабатывающего завода

**Table 1.** Soil profile structure in the territory of the Tyumen Federal Reserve and in the area of the Antipinsky Oil Refinery

Горизонт Horizon	Глубина, см/Depth, cm	
	ТФЗ Tyumen Federal Reserve	НПЗ Antipinsky Oil Refinery
A0	0–4	0–4
A1	4–12	4–13
A1A2	14–24	13–32
A2	24–52	32–49
A2B	52–60	49–70
B	60–90	70–85
BC	–	85–120

Общее количество проб почвы – 56, включая 20 для ТФЗ, 36 для Антипинского НПЗ.

Ландшафт исследованного участка ТФЗ представлен березово-сосновым с липой лесом. Район размещения Антипинского НПЗ – природно-техногенная территория радиусом около 2 км от объекта с разной степенью техногенной трансформации. Наиболее преобразован техногенезом участок к северу от завода, протягивающийся до берега реки Туры и представленный урбанизированным районом (поселок Антипино). Территории в восточном и западном направлениях от НПЗ преимущественно урбанизированы, но сохранили участки лиственного леса. К югу находится наименее техногенно трансформированный район. Здесь сохранились участки лиственного, хвойного и смешанного леса с несколькими редко разбросанными техногенными объектами.

Почвы территорий исследования принадлежат к дерново-подзолисто-му типу [31]. Ввиду того, что значительная часть территории нахождения НПЗ представлена урбанизированным районом, вызванные этим техногенные изменения привели к распространению урбаноземов. Материнскими породами на изученных территориях являются песчано-аллювиальные отложения, что отразилось в гранулометрическом составе почв преобладанием легких и средних суглинков. Однако подстилающие породы различны: в рассматриваемом районе ТФЗ они представлены верхне-олигоценными алевритами и алевристыми глинами туртасской свиты с линзами тонкозернистых песков, в районе НПЗ – средне- и верхнеоценовыми алевристыми зеленоцветными глинами тавдинской свиты с присыпками и гнездами песков и алевритов, прослоями кварцево-глауконитовых песков и включениями глинистых сидеритов, и нижнеолигоценными песками куртамышской свиты с прослоями глин, алевритов, с линзами лигнита и включениями растительных остатков к югу [32].

Содержание химических элементов в почвах было определено методом инструментального нейтронно-активационного анализа. Работы осуществляли с использованием многоканального анализатора импуль-

сов АМА 02Ф с полупроводниковым Ge-Li детектором ДГДК-63А в ядерно-геохимической лаборатории ТПУ. Стандартным образцом служил БИЛ-1 [33].

Гранулометрический состав почв определен в соответствии с ГОСТ 12536-2014 путем просеивания через ряд сит: 0,5, 0,25, 0,125, 0,1, 0,04 мм. Содержание магнитной фракции установлено путем выделения ее методом обработки почвы магнитом. Содержание гумуса и pH определено методом Тюрина в соответствии с ГОСТ 26213-91 и методом солевой вытяжки в соответствии с ГОСТ 26483-85.

Статистические показатели вычислялись с использованием пакета анализа Statistika 6.0. Качественные характеристики содержания химических элементов описывает коэффициент концентрации химических элементов (Кк), вычисляемый как отношение содержания химического элемента в конкретной среде к фоновому [34].

#### Результаты исследования и обсуждение

В гранулометрическом составе почв изученных территорий наблюдается преобладание фракций, соответствующих тонкому песку, размерностью от 0,04 до 0,125 мм, согласно классификации (Качинский, 1957) (рис. 1).

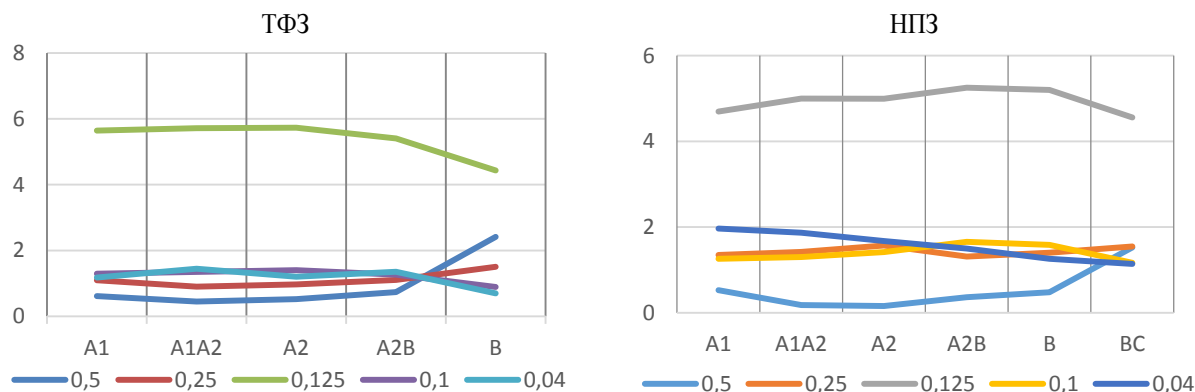


Рис. 1. Распределение фракций по профилю почвы территории Тюменского федерального заказника и территории расположения Антипинского нефтеперерабатывающего завода (г из 10 г)

Fig. 1. Distribution of fractions along the soil profile in the territory of the Tyumen Federal Reserve and in the territory of the Antipinsky Oil Refinery (g/10 g)

На территории расположения НПЗ в верхней части профиля больше доля фракции 0,04 мм относительно фракции 0,125 мм (рис. 1), то есть почва здесь имеет более тонкозернистый гранулометрический состав.

Распределение гранулометрических фракций по профилю происходит по близким закономерностям. В большинстве горизонтов оно равномерно, за исключением горизонта В. В нем возрастает доля фракций, соответствующих среднему песку, за счет снижения содержания фракций крупной пыли (рис. 1).

Доля магнитной фракции в почве территории ТФЗ в среднем составляет около 3 % (рис. 2).

Доля магнитной фракции почвы ТФЗ минимальна в горизонте А1А2 и возрастает с глубиной до максимальной в горизонте В (рис. 2).

Для почвы территории расположения НПЗ этот показатель ниже (чуть больше 2,6 %).

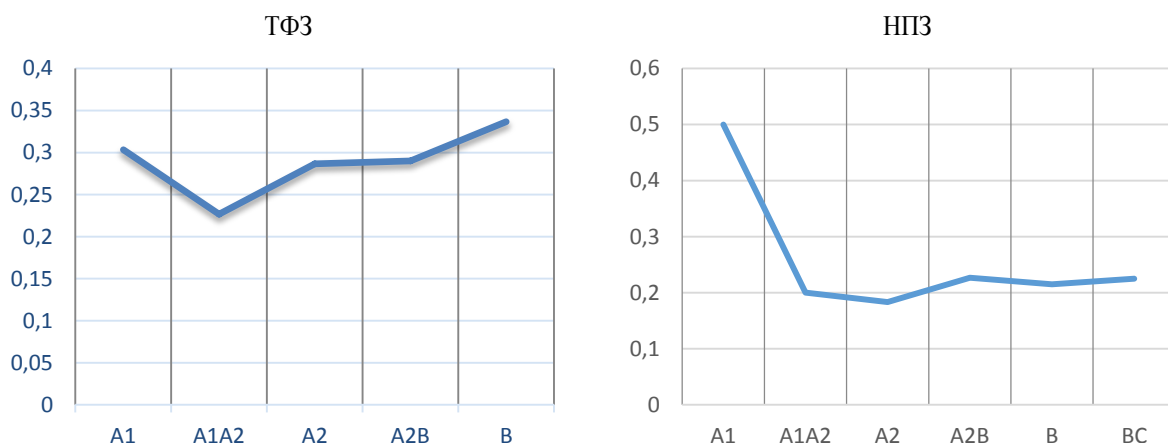
К тому же, в отличие от почвы ТФЗ, наибольшая доля магнитной фракции наблюдается в горизонте А1. В остальной части профиля ее распределение близко к равномерному (рис. 2).

Почва территории ТФЗ характеризуется наибольшим содержанием гумуса в горизонте А2 (рис. 3).

В горизонте А содержание гумуса в почве дерново-подзолистого типа наибольшее (3–7 %) [35]. На изученной территории выявлены меньшие показатели: максимальное значение наблюдается в горизонте А2 и составляет 2,5 %, в остальных горизонтах доля гумуса менее 0,5 %.

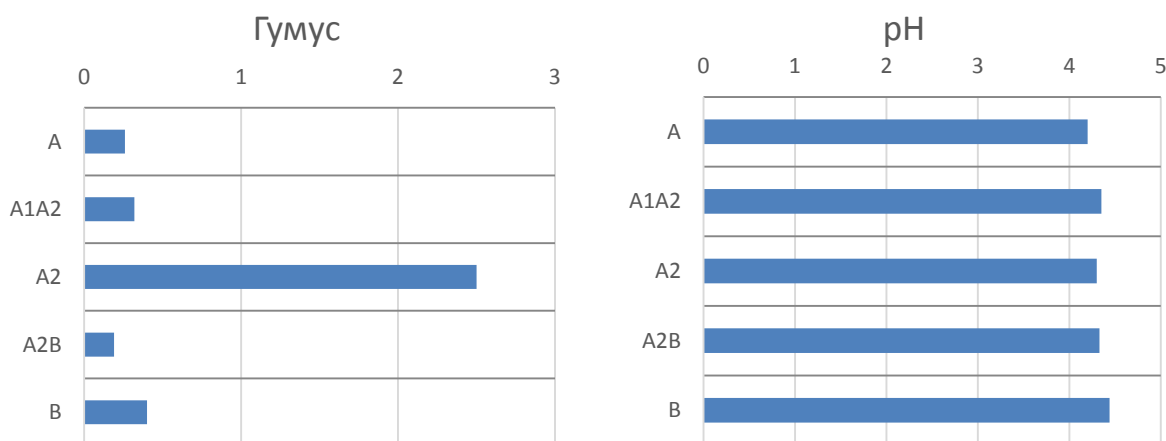
Показатель pH в изученной почве также соответствует отмеченному в литературных источниках диапазону – от 3,3 до 5,5 [36]. Он возрастает с глубиной примерно от 4,2 в верхней части профиля до 4,44 в нижней. Данная закономерность также отмечена в литературе [37].





**Рис. 2.** Распределение магнитной фракции по профилю почвы территории Тюменского федерального заказника и территории расположения Антипинского нефтеперерабатывающего завода (г из 10 г)

**Fig. 2.** Distribution of the magnetic fraction along the soil profile in the territory of the Tyumen Federal Reserve and in the territory of the Antipinsky Oil Refinery (g/10 g)



**Рис. 3.** Содержание гумуса (%) и pH в почве территории Тюменского федерального заказника

**Fig. 3.** Humus content (%) and pH in the soil of the Tyumen Federal Reserve

Данные по содержанию таких специфических для нефтеперерабатывающей промышленности элементов, как Zn, Br, Sb, Co, As, представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Содержание изученных химических элементов в профиле почв рассмотренных территорий (мг/кг)

**Table 2.** Content of the studied chemical elements in the soil profile of the considered territories (mg/kg)

Горизонт Horizon	Zn		Br		Sb		As		Co	
	ТФЗ Tyumen Federal Reserve	НПЗ Antipinsky Oil Refinery	ТФЗ Tyumen Federal Reserve	НПЗ Antipinsky Oil Refinery	ТФЗ Tyumen Federal Reserve	НПЗ Antipinsky Oil Refinery	ТФЗ Tyumen Federal Reserve	НПЗ Antipinsky Oil Refinery	ТФЗ Tyumen Federal Reserve	НПЗ Antipinsky Oil Refinery
A1	14,95	18,70	0,81	1,42	0,25	0,38	1,37	1,43	4,70	6,74
A1A2	5,47	12,30	0,61	0,65	0,17	0,21	0,58	0,27	3,58	2,47
A2	9,20	6,93	0,52	0,50	0,18	0,14	0,97	0,73	4,59	2,61
A2B	7,60	10,70	0,44	0,44	0,22	0,20	0,91	0,65	6	2,86
B	18,53	9,50	0,82	0,59	0,27	0,17	2,31	0,76	7,22	2,83
BC	-	6,15	-	0,70	-	0,30	-	1,04	-	3,71

Содержание их в верхнем горизонте почвы территории ТФЗ ниже кларковых значений (табл. 3).

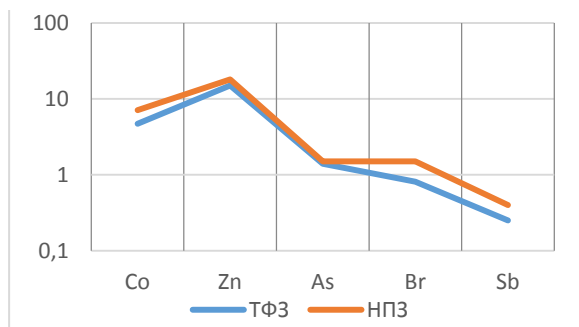
**Таблица 3.** Геохимические ряды для верхнего горизонта почв изученных территорий относительно кларка (Ярошевский, 1990)

**Table 3.** Geochemical series for the upper soil horizon of the studied territories relative to the clarke

ТФЗ/кларк Tyumen Federal Reserve/clarke	$Co_{0,52} > Sb_{0,28} > Zn_{0,25} > As_{0,23} > Br_{0,02}$
НПЗ/кларк Antipinsky Oil Refinery/clarke	$Co_{0,79} > Sb_{0,44} > Zn_{0,3} > As_{0,26} > Br_{0,045}$

Это актуально и для горизонта A1 почвы района расположения НПЗ, хотя здесь выше коэффициенты концентрации. Это отражает невысокую техногенную нагруженность территории расположения предприятия за относительно непродолжительный срок его функционирования.

Техногенная измененность этой территории проявляется при сопоставлении ее с территорией ТФЗ. Это выявляет повышенные содержания всех рассматриваемых элементов в почве, подверженной воздействию НПЗ (рис. 4).



**Рис. 4.** Содержание химических элементов в горизонте А1 почвы территории расположения Антипинского нефтеперерабатывающего завода в сравнении с Тюменским федеральным заказником (мг/кг, логарифмическая шкала)

**Fig. 4.** Content of chemical elements in the A1 horizon of the soil in the territory of the Antipinsky Oil Refinery in comparison with the Tyumen Federal Reserve (mg/kg, logarithmic scale)

Сравнение данных по этим элементам для изученных территорий по горизонтам отражает техногенное их поступление в почву района размещения НПЗ с атмосферными выпадениями, о чем свидетельствуют наибольшие коэффициенты концентрации в горизонте А1 и их сокращение книзу (табл. 4).

Исключение составляет Zn. В отличие от прочих рассмотренных элементов, наибольший коэффициент концентрации наблюдается для него в горизонте А1А2. К тому же проявляется повышенное его

накопление в нижней части профиля, в горизонте А2В.

**Таблица 4.** Геохимические ряды для профиля почвы территории расположения Антипинского нефтеперерабатывающего завода относительно Тюменского федерального заказника

**Table 4.** Geochemical series for the soil profile in the territory of the Antipinsky Oil Refinery in relation to the Tyumen Federal Reserve

A1	<b>Br<sub>1,7</sub>&gt;Sb<sub>1,5</sub>&gt;Co<sub>1,4</sub>&gt;Zn<sub>1,2</sub>&gt;As<sub>1</sub></b>
A1A2	<b>Zn<sub>2,3</sub>&gt;Sb<sub>1,3</sub>&gt;Br<sub>1,1</sub>&gt;Co<sub>0,69</sub>&gt;As<sub>0,46</sub></b>
A2	Br <sub>0,95</sub> >Sb <sub>0,76</sub> >Zn <sub>0,75</sub> >As <sub>0,75</sub> >Co <sub>0,57</sub>
A2B	<b>Zn<sub>1,4</sub>&gt;Br<sub>0,98</sub>&gt;Sb<sub>0,92</sub>&gt;As<sub>0,71</sub>&gt;Co<sub>0,48</sub></b>
B	Br <sub>0,72</sub> >Sb <sub>0,64</sub> >Zn <sub>0,51</sub> >Co <sub>0,39</sub> >As <sub>0,33</sub>

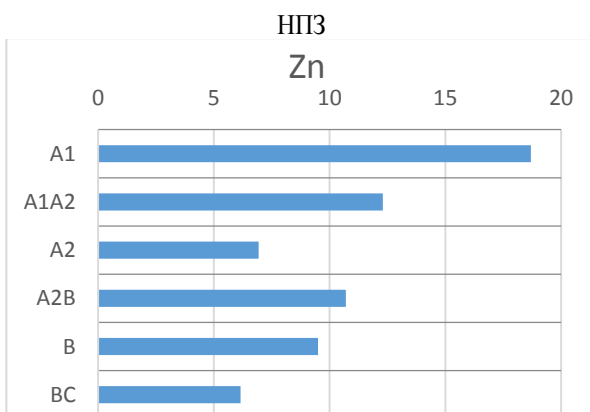
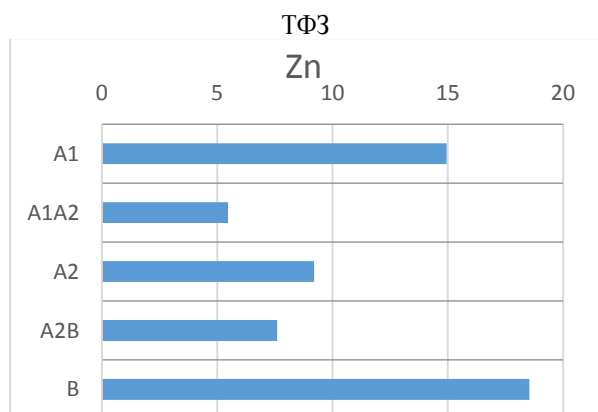
**Примечание:** жирным выделены элементы с  $K_k \geq 1$ .

**Note:** elements with concentration coefficient  $\geq 1$  are marked in bold.

В горизонте А1А2, помимо Zn, повышенные коэффициенты концентрации сохраняют Br и Sb. Co и As содержатся в повышенных количествах только в А1.

Сопоставление распределения рассматриваемых элементов по профилю свидетельствует об изменении этих закономерностей в почве района расположения НПЗ относительно территории ТФЗ.

Так, в почве территории ТФЗ Zn проявляет преимущественное накопление в горизонтах В и А1. В почве района влияния НПЗ наибольшее накопление характерно для горизонта А1, большее, чем в первом случае. Книзу наблюдается сокращение концентрации (рис. 5).



**Рис. 5.** Содержание Zn в профиле почв Тюменского федерального заказника и Антипинского нефтеперерабатывающего завода (мг/кг)

**Fig. 5.** Zn content in the soil profile of the Tyumen Federal Reserve and Antipinsky Oil Refinery (mg/kg)

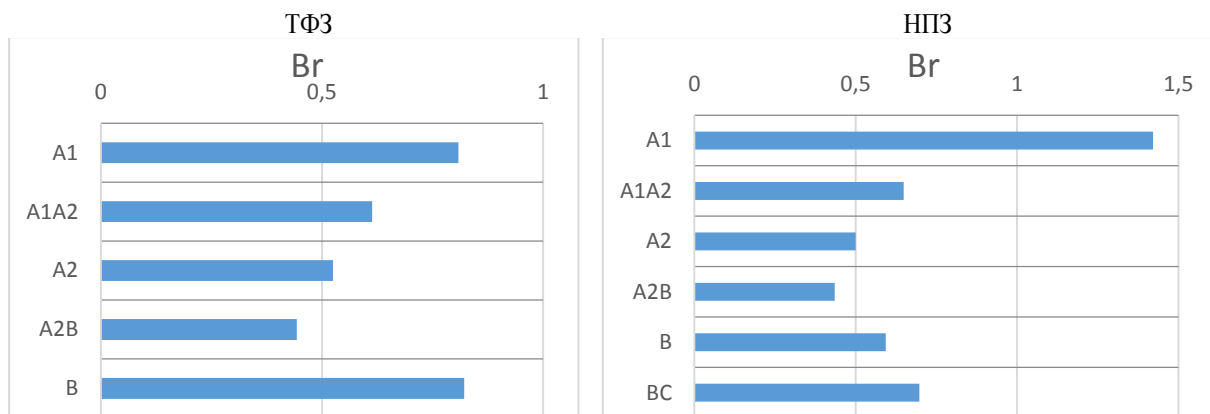
В соответствии с литературными данными для Zn в дерново-подзолистых почвах характерно возрастание содержания с глубиной [38], что отчасти проявляется в почве ТФЗ. Это обусловлено удержанием этого элемента глинистой фракцией и соединениями Fe [39, 40]. Накопление в верхнем горизонте объясняется удержанием Zn органическим веществом в виде гуминовых и фульвокислот [41].

Br на фоновой территории ТФЗ проявляет наибольшее, почти равное, накопление в горизонтах А1 и В. В целом наблюдается сокращение содержания книзу. В почве территории НПЗ сохраня-

ются сходные закономерности распределения по профилю за исключением значительного повышения содержания в горизонте А1 (рис. 6).

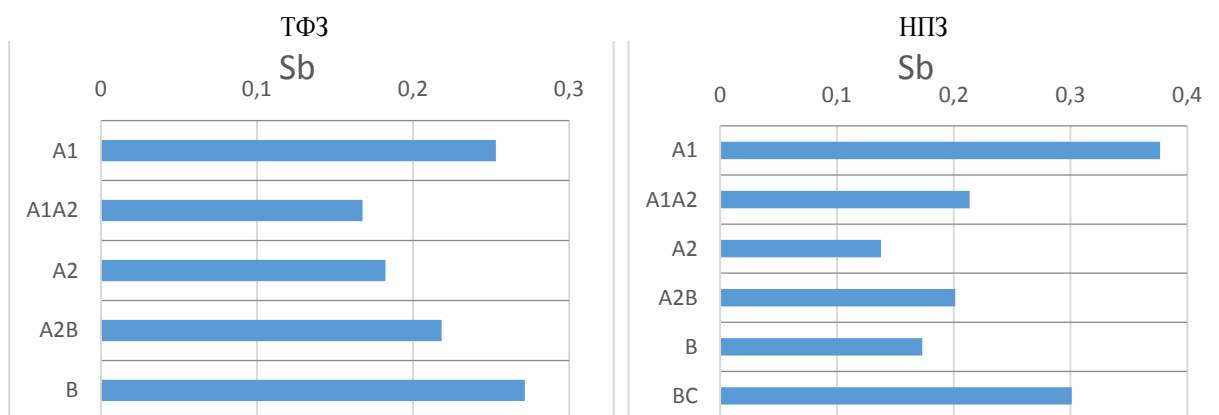
Накопление Br в верхнем горизонте считается характерным и объясняется атмосферным выпадением ввиду высокой летучести [42].

Для Sb характерно возрастание содержания книзу в почве ТФЗ. Наибольшее накопление наблюдается в горизонте В, чуть меньшее – в А1. В почве района расположения ТФЗ нарушаются общие фоновые закономерности распределения, значительно возрастает содержание элемента в горизонте А1 (рис. 7).



**Рис. 6.** Содержание Br в профиле почв Тюменского федерального заказника и Антипинского нефтеперерабатывающего завода (мг/кг)

**Fig. 6.** Br content in the soil profile of the Tyumen Federal Reserve and Antipinsky Oil Refinery (mg/kg)



**Рис. 7.** Содержание Sb в профиле почв Тюменского федерального заказника и Антипинского нефтеперерабатывающего завода (мг/кг)

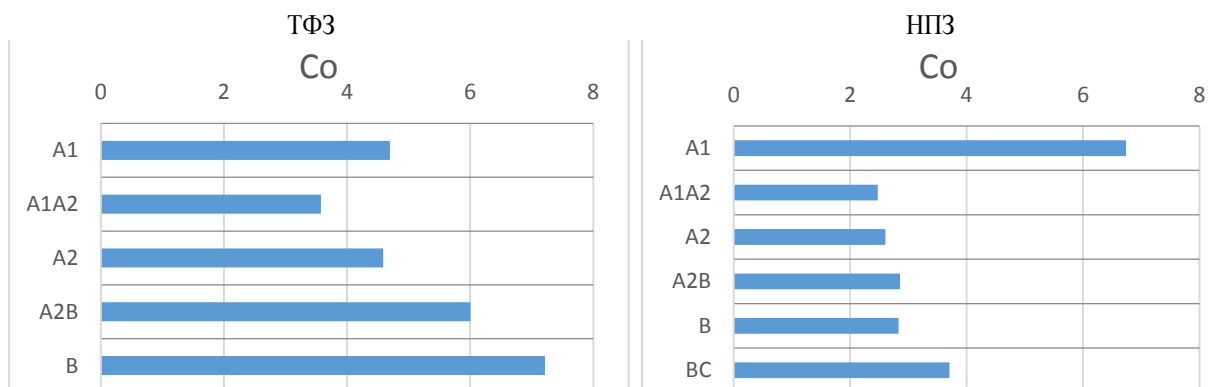
**Fig. 7.** Sb content in the soil profile of the Tyumen Federal Reserve and Antipinsky Oil Refinery (mg/kg)

Характер распределения Sb по разрезу определяется удержанием данного элемента гидроксидами железа [39, 40], органическим веществом [43], глинистыми минералами [44].

Аналогичная ситуация наблюдается для Co. В почве ТФЗ проявляется схожее распределение с возрастанием содержания книзу. Под техногенной нагрузкой НПЗ также существенно повышается

накопление в горизонте A1. В остальной части профиля содержание сокращается (рис. 8).

Сидерофильный Co близок по закономерностям распределения к Fe: вынос из горизонта A1A2 и повышение содержания книзу. Но для Co наблюдаются большие различия в содержании между верхней и средней частями профиля. Такой характер распределения обусловлен поступлением этих элементов в почвы из материнских пород [42, 36].



**Рис. 8.** Содержание Co в профиле почв Тюменского федерального заказника и Антипинского нефтеперерабатывающего завода (мг/кг)

**Fig. 8.** Co content in the soil profile of the Tyumen Federal Reserve and Antipinsky Oil Refinery (mg/kg)

Для As в почве ТФЗ характерно преимущественное накопление в горизонте В. Также наблюдается накопление в горизонте А1. В почве района расположения ТФЗ в А1 сохраняется близкое содержание, но

в остальной части профиля оно значительно ниже, особенно в В. Вследствие этого преимущественное накопление здесь характерно для А1 (рис. 9).

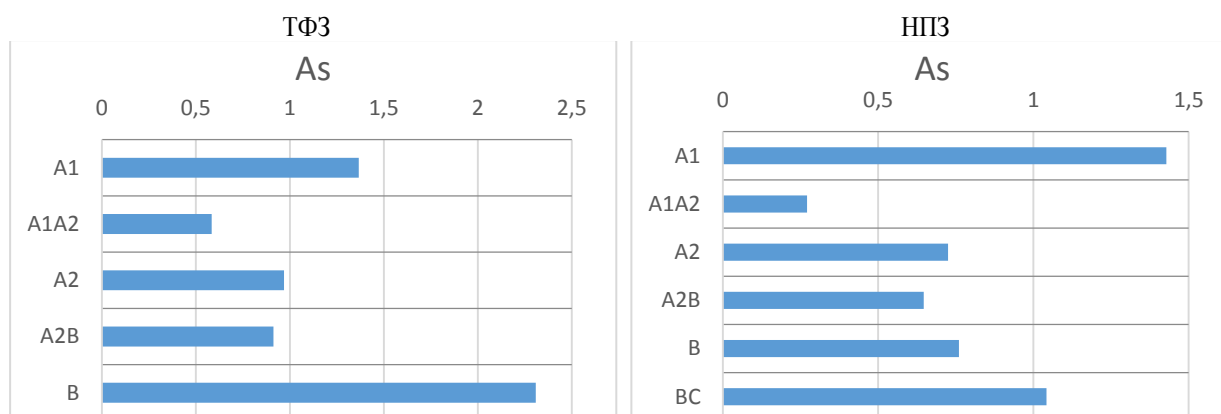


Рис. 9. Содержание As в профиле почв Тюменского федерального заказника и Антипинского нефтеперерабатывающего завода (мг/кг)

Fig. 9. As content in the soil profile of the Tyumen Federal Reserve and Antipinsky Oil Refinery (mg/kg)

As имеет близкий характер распределения к Fe, что обусловлено родством к нему [39, 42, 43]. Повышенное содержание в горизонте В по отношению к А наблюдается в подзолистых почвах других регионов [42].

Таким образом, халькофильные As, Zn и Sb аналогичны по закономерностям распределения, но Zn больше накапливается в А1 и А2, а Sb – в А1 и А2В, ввиду чего содержание последней равномерно повышается книзу.

#### Выводы

1. В почвах исследованных территорий содержание рассмотренных элементов ниже кларка.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соломонов А.П. Развитие мировой нефтепереработки под влиянием структурных изменений в топливно-энергетическом балансе // Вестник евразийской науки. – 2019. – № 6. URL: <https://esj.today/PDF/33ECVN619.pdf> (дата обращения 12.01.2021).
2. Барагинский О.Б. Нефтегазовый комплекс мира. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2006. – 640 с.
3. Нефтеперерабатывающие заводы России // ПроНПЗ. URL: <https://pronpz.ru/nefeperebatyvayushchie-zavody/rossiya.html> (дата обращения 12.01.2021).
4. Лобачева А.А. Влияние ОАО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод» на почвенный и растительный покров прилегающих территорий: дис. ... канд. биол. наук. – Самара. 2010. – 225 с.
5. Simulating behavior of petroleum compounds during refinery effluent treatment using the SimpleTreat model / N.W. Thunnissen, D. van de Meent, J. Struijs, M. Hjort, A.D. Redman, M.G.D. Smit, A.J. Hendriks, R. van Zelm // Chemosphere. – 2021. – V. 263. – 128081. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128081> (дата обращения 12.01.2021).
6. Development of low-cost activated carbon towards an eco-efficient removal of organic pollutants from oily wastewater / R. Remmani, R. Makhloufi, M. Miladi, A. Ouakouak, A.R. Canales, D. Núñez-Gómez // Polish Journal of Environmental Studies. – 2021. – V. 30. – № 2. – P. 1801–1808. URL: <https://doi.org/10.15244/pjoes/125765> (дата обращения 12.01.2021).

2. Верхний горизонт почвы района размещения Антипинского нефтеперерабатывающего завода отличается от почвы территории Тюменского федерального заказника повышенным содержанием рассмотренных химических элементов.
3. В районе деятельности Антипинского нефтеперерабатывающего завода наблюдается изменение закономерностей содержания данных элементов по профилю с увеличением накопления в горизонте А1.

Подготовка статьи осуществлялась при поддержке гранта РНФ 20-64-47021.

7. Photocatalytic oxidative degradation of hydrocarbon pollutants in refinery wastewater using TiO<sub>2</sub> as catalyst / I. Ul haq, W. Ahmad, I. Ahmad, M. Yaseen // Water Environment Research. – 2020. – V. 92. – № 12. – P. 2086–2094. URL: <https://doi.org/10.1002/wer.1370> (дата обращения 12.01.2021).
8. Tetteh E.K., Rathilal S., Naidoo D.B. Photocatalytic degradation of oily waste and phenol from a local South Africa oil refinery wastewater using response methodology // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – 8850. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65480-5> (дата обращения 12.01.2021).
9. Emissions of volatile organic compounds from crude oil processing – Global emission inventory and environmental release. / H. Rajabi, M.H. Mosleh, P. Mandal, A.R. Lea-Langton, M. Sedighi // Science of the Total Environment. – 2020. – V. 727. – 138654. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138654> (дата обращения 12.01.2021).
10. Tarafdar A., Sinha A. Public health risk assessment with bioaccessibility considerations for soil PAHs at oil refinery vicinity areas in India // Science of The Total Environment. – 2018. – V. 616. – P. 1477–1484.
11. Alharbi B.H., Pasha M.J., Al-Shamsi M.A.S. Influence of different urban structures on metal contamination in two metropolitan cities. – 2019. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40180-x> (дата обращения 12.01.2021).
12. Epstein A.C. The human health implications of oil and natural gas development // Environmental Issues Concerning Hydraulic Fracturing. – 2017. – V. 1. – P. 113–145.
13. Brockmeyer S., D'Angiulli A. How air pollution alters brain development: the role of neuroinflammation // Translational Neuroscience. – 2016. – № 7 (1). – P. 24–30.

14. Heavy metal pollution of oil-based drill cuttings at a shale gas drilling field in Chongqing, China: a human health risk assessment for the workers / T. Xu, L. Wang, X. Wang, T. Li, X. Zhan // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2018. – № 165 – P. 160–163.
15. Numerical analysis of frozen soil around the Mohe–Daqing crude oil pipeline with thermosyphons / L. Fang, B. Yu, J. Li, Y. Zhao, G. Yu, W. Zhao // *Heat Transfer Engineering*. – 2018. – V. 39. – № 7–8. – P. 630–641.
16. Kuang S., Lang Q., Yu W. Effects of aged oil sludge on soil physicochemical properties and fungal diversity revealed by high-throughput sequencing analysis // *Archaea in Wastewater Treatment: Current Research and Emerging Technology*. – 2018. – V. 2018. – 9264259. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/9264259> (дата обращения 12.01.2021).
17. Unitary and binary remediations by plant and microorganism on refining oil-contaminated soil / J.J. Fei, Y.Y. Wan, X.Y. He, Z.H. Zhang, X.Y. Yu // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – 41253–41264. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10025-6> (дата обращения 12.01.2021).
18. Hatami E., Abbaspour A., Dorostkar V. Phytoremediation of a petroleum-polluted soil by native plant species in Lorestan Province, Iran // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – V. 26. – 24323–24330. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1297-7> (дата обращения 12.01.2021).
19. Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: improvement opportunities and field applications / I. Hussain, M. Puschenreiter, S. Gerhard, P. Schöftner, S. Yousaf, A. Wang, J.H. Syed, T.G. Reichenauer // *Environmental and Experimental Botany*. – 2018. – V. 147. – P. 202–219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.016> (дата обращения 12.01.2021).
20. O'Brien P.L., Desutter T.M., Casey F.X.M. Natural degradation of low-level petroleum hydrocarbon contamination under crop management // *Journal of Soils and Sediments*. – 2019. – V. 19. – P. 1367–1373. URL: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2153-6> (дата обращения 12.01.2021).
21. Jafarnejad, S., Jiang S.C. Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewaters // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2019. – V. 7. – № 5. – 103326. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103326> (дата обращения 12.01.2021).
22. Летувинкас А.И. Антропогенные геохимические аномалии и природная среда. 2-е изд., доп. и испр. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 290 с.
23. Абросимов А.А. Экология переработки углеводородных систем / под ред. д-ра хим. наук, проф. М.Ю. Доломатова, д-ра техн. наук, проф. Э.Г. Теляшева. – М.: Химия, 2002. – 608 с.
24. A characterization of the soils and sediments in contaminated sites and rivers using petroleum biomarker compounds / N.-H. Kao, M.-C. Su, C.-C. Yen, Y.-J. Huang // *Journal of Soils and Sediments*. – 2019. – № 19. – P. 241–254.
25. Опекунова М.Г. Биоиндикация загрязнений. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2004. – 266 с.
26. Изменение элементного состава верхнего горизонта почв под воздействием предприятий нефтегазопереработки / В.В. Боев, Н.В. Барановская, В.А. Боев, М.Т. Джамбаев, Т.С. Шахова, Л.В. Жорняк // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 11 – С. 179–191.
27. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб: межгосударственный стандарт ГОСТ 17.4.3.01-2017: введен 01.01.19. – М.: Стандартинформ, 2018. – 4 с.
28. Методы изучения лесных сообществ / под ред. Яришко В.Т., Лянгузовой И.В. – СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. – 240 с.
29. Розанов Б.Г. Морфология почв. – М.: Академический проект, 2004. – 432 с.
30. Фомин Г.С., Фомин А.Г. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам. Справочник. – М.: Госстандарт России, 2001. – 300 с.
31. Полевой определитель почв / под ред. Острикова К.Т. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 182 с.
32. Геологическая карта Тюменской области (южные районы). Масштаб 1:2500000. URL: [http://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/ufo/tyumenskaya\\_obl/](http://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/ufo/tyumenskaya_obl/) (дата обращения 12.01.2021).
33. Судыко А.Ф. Определение урана, тория, скандия и некоторых редкоземельных элементов в двадцати четырех стандартных образцах сравнения инструментальным нейтронно-активационным методом // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 620–624.
34. Ревич Б.А., Саг Ю.Е., Смирнова Р.С. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве (Утв. 15 мая 1990 г. № 5174-90). – М.: ИМГРЭ, 1990. – 16 с.
35. Почвоведение. В 2 ч. Ч. 2. Типы почв, их география и использование / Л.Г. Богатырев, В.Д. Васильевская, А.С. Владыченский и др. – М.: Высш. шк., 1988. – 368 с.
36. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1990. – 286 с.
37. Горшенкин К.П. Почвы южной части Сибири. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 592 с.
38. Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Кондратенко Б.М. Оценка фонового содержания тяжелых металлов в почвах европейского северо-востока России // *Почвоведение*. – 2007. – № 9. – С. 1064–1070.
39. Водяницкий Ю.Н. Роль соединений железа в закреплении тяжелых металлов и металлоидов в почвах (обзор литературы) // *Почвоведение*. – 2010. – № 5. – С. 558–572.
40. Manceau A., Marcus M.A., Tamura N. Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques // *Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 2002. – V. 49. – P. 341–428.
41. Саенко Г.Н. Металлы и галогены в морских организмах. – М.: Наука, 1992. – 200 с.
42. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: в 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. – М.: Недра, 1994. – 2558 с.
43. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments / L. El Bilali, P.E. Rasmussen, G.E.M. Hall, D. Fortin // *Applied Geochemistry*. – 2002. – V. 17. – P. 1171–1181.
44. Leuz A.-K., Monch H., Johnson C.A. Sorption of Sb (III) and Sb (V) to goethite: Influence on Sb (III) oxidation and mobilization // *Environmental Science & Technology*. – 2006. – V. 40. – P. 7277–7282.

Поступила 13.10.2021 г.

#### Информация об авторах

**Боев В.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геоэкологии Тюменского государственного университета.

**Барановская Н.В.**, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Боев В.А.**, кандидат биологических наук, доцент кафедры геоэкологии Тюменского государственного университета.

UDC 550.424.2:665.6

## CHANGE OF MIGRATION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE AREA OF LOCATION OF THE PETROLEUM REFINING PLANT

Vladislav V. Boev<sup>1</sup>,  
v.-3@mail.ru

Natalya V. Baranovskaya<sup>2</sup>,  
natalya.baranovs@mail.ru

Viktor A. Boev<sup>1</sup>,  
vikboev2009@mail.ru

<sup>1</sup> Tyumen State University,  
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

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

**The relevance** of the research is caused by the lack of data on the impact of many oil refineries on adjacent soils for specific regions, determined by design and technological features, while the general geochemical specifics of the oil refining industry are studied.

**The main aim** of the research is to identify the features of accumulation in soils and distribution along the profile of some chemical elements specific to the oil refining industry in the area of operation of a relatively new oil refinery by comparing them with data for a background area with similar natural conditions and clarks.

**Objects** of the research are soils of the Tyumen Federal Reserve and the territory of the location of Antipinsky Oil Refinery.

**Methods:** selection and preparation of test plots and soils, determination of the elemental composition by instrumental neutron activation and atomic absorption methods, interpretation of results.

**Results.** The content of Br, Sb, Zn, As, Co in the soils of the eastern part of the Tyumen Federal Reserve and the area of the Antipinsky Oil Refinery, and their distribution along the profile were studied. By comparing the results obtained, an increased content of these chemical elements in the A1 horizon of the soils of the territory where the Antipinsky Oil Refinery is located relative to the Tyumen Federal Reserve and a change in the patterns of their distribution along the profile were revealed. In the soil of the region near the technogenic object, the increased content of the considered chemical elements decreases from top to bottom, which is observed both in absolute values and in concentration coefficients relative to the conditional background data of the soils of the Tyumen Federal Reserve. This indicates the arrival of these elements from the surface. At the same time, in both territories, the content of chemical elements is lower than the clarks, which reflects a relatively low technogenic load in these areas.

### Key words:

Soils elemental composition, Tyumen Federal Reserve, Antipinsky Oil Refinery, technogenic impact of oil refining on soils, technogenic transformation of soils.

The research was supported by the RSF grant 20-64-47021.

### REFERENCES

- Solomonov A.P. Development of world oil processing under the influence of structural changes in fuel and energy balance. *The Eurasian Scientific Journal*, 2019, vol. 6 (11). In Rus. Available at: <https://esj.today/PDF/33ECVN619.pdf> (accessed 12 January 2021)
- Baraginskiy O.B. *Neftegazovy kompleks mira* [Oil and gas complex of the world]. Moscow, «Nef't i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2006. 640 p.
- Neftepererabatyvayushhie zavody Rossii* [Oil refineries in Russia]. Available at: <https://pronpz.ru/neftepererabatyvayushchie-zavody/rossiya.html> (accessed 12 January 2021).
- Lobacheva A.A. *Vliyaniye OAO «Kuybyshevskiy neftepererabatyvayushchiy zavod» na pochvenny i rastitelny pokrov prilagayushchikh territoriy*. Dis. Kand. nauk [The influence of Kuibyshev Refinery OJSC on soil and plant cover of the adjacent territories. Cand. Diss.]. Samara, 2010. 225 p.
- Thunnissen N.W., Van de Meent D., Struijs J., Hjort M., Redman A.D., Smit M.G.D., Hendriks A.J., Van Zelm R. Simulating behavior of petroleum compounds during refinery effluent treatment using the SimpleTreat model. *Chemosphere*, 2021, vol. 263, 128081. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128081> (accessed 12 January 2021).
- Remmani R., Makhloufi R., Miladi M., Ouakouak A., Canales A.R., Núñez-Gómez D. Development of low-cost activated carbon towards an eco-efficient removal of organic pollutants from oily wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, vol. 30, no. 2, pp. 1801–1808. Available at: <https://doi.org/10.15244/pjoes/125765> (accessed 12 January 2021).
- Ul haq I., Ahmad W., Ahmad I., Yaseen M. Photocatalytic oxidative degradation of hydrocarbon pollutants in refinery wastewater using TiO<sub>2</sub> as catalyst. *Water Environment Research*, 2020, vol. 92, no. 12, pp. 2086–2094. Available at: <https://doi.org/10.1002/wer.1370> (accessed 12 January 2021).
- Tetteh E.K., Rathilal S., Naidoo D.B. Photocatalytic degradation of oily waste and phenol from a local South Africa oil refinery wastewater using response methodology. *Scientific Report*, 2020, vol. 10, 8850. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65480-5> (accessed 12 January 2021).
- Rajabi H., Mosleh M.H., Mandal P., Lea-Langton A.R., Sedighi M. Emissions of volatile organic compounds from crude oil processing – global emission inventory and environmental release. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 727, 138654. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138654> (accessed 12 January 2021).
- Tarafdar A., Sinha A. Public health risk assessment with bioaccessibility considerations for soil PAHs at oil refinery vicinity areas in India. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 616, pp. 1477–1484.
- Alharbi B.H., Pasha M.J., Al-Shamsi M.A.S. *Influence of Different Urban Structures on Metal Contamination in Two Metropolitan Cities*. 2019. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40180-x> (accessed 12 January 2021).

12. Epstein A.C. The human health implications of oil and natural gas development. *Environmental Issues Concerning Hydraulic Fracturing*, 2017, vol. 1, pp. 113–145.
13. Brockmeyer S., D'Angiulli A. How air pollution alters brain development: the role of neuroinflammation. *Translational Neuroscience*, 2016, no. 7 (1), pp. 24–30.
14. Xu T., Wang L., Wang X., Li T., Zhan X. Heavy metal pollution of oil-based drill cuttings at a shale gas drilling field in Chongqing, China: a human health risk assessment for the workers. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, no. 165, pp. 160–163.
15. Fang L., Yu B., Li J., Zhao Y., Yu G., Zhao W. Numerical analysis of frozen soil around the Mohe–Daqing crude oil pipeline with thermosyphons. *Heat Transfer Engineering*, 2018, vol. 39, no. 7–8, pp. 630–641.
16. Kuang S., Lang Q., Yu W. Effects of aged oil sludge on soil physicochemical properties and fungal diversity revealed by high-throughput sequencing analysis. *Archaea in Wastewater Treatment: Current Research and Emerging Technology*, 2018, vol. 2018, 9264259. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/9264259> (accessed 12 January 2021).
17. Fei J.J., Wan Y.Y., He X.Y., Zhang Z.H., Yu X.Y. Unitary and binary remediations by plant and microorganism on refining oil-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, 41253–41264. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10025-6> (accessed 12 January 2021).
18. Hatami E., Abbaspour A., Dorostkar V. Phytoremediation of a petroleum-polluted soil by native plant species in Lorestan Province, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, 24323–24330. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1297-7> (accessed 12 January 2021).
19. Hussain I., Puschenreiter M., Gerhard S., Schöftner P., Yousaf S., Wang A., Syed J.H., Reichenauer T.G. Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: improvement opportunities and field applications. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, vol. 147, pp. 202–219. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.016> (accessed 12 January 2021).
20. O'Brien P.L., Desutter T.M., Casey F.X.M. Natural degradation of low-level petroleum hydrocarbon contamination under crop management. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, vol. 19, pp. 1367–1373. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2153-6> (accessed 12 January 2021).
21. Jafarnejad S., Jiang S.C. Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, vol. 7, no. 5, 103326. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103326> (accessed 12 January 2021).
22. Letuvninkas A.I. *Antropogennye geokhimicheskie anomalii i prirodnyaya sreda* [Anthropogenic geochemical anomalies and the natural environment]. Tomsk, NTL Publ., 2005. 290 p.
23. Abrosimov A.A. *Ekologiya pererabotki uglevodorodnykh sistem* [Ecology of processing hydrocarbon systems]. Moscow, Khimiya Publ., 2002. 608 p.
24. Kao N.-H., Su M.-C., Yen C.-C., Huang Y.-J. A characterization of the soils and sediments in contaminated sites and rivers using petroleum biomarker compounds. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, no. 19, pp. 241–254.
25. Opekunova M.G. *Bioindikatsiya zagryazneniy* [Bioindication of pollution]. St. Petersburg, S.-Petersburg University Publ., 2004. 266 p.
26. Boev V.V., Baranovskaya N.V., Boev V.A., Yambayev M.T., Shakhova T.S., Zhorniyak L.V. Change of elemental composition of soil upper horizon under the influence of oil and gas refining enterprises. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 179–191. In Rus.
27. *Okhrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob: mezhgosudarstvennyy standart GOST 17.4.3.01-2017* [Conservation of nature. Soils. General requirements for sampling: interstate SS 17.4.3.01-2017]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 4 p.
28. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Methods for studying forest communities]. St. Petersburg, NIIXimii SPbGU Publ., 2002. 240 p.
29. Rozanov B.G. *Morfologiya pochv* [Soil morphology]. Moscow, Akademicheskyy proekt Publ., 2004. 432 p.
30. Fomin G.S., Fomin A.G. *Pochva. Kontrol kachestva i ekologicheskoy bezopasnosti po mezhdunarodnym standartam. Spravochnik* [Soil. Quality control and environmental safety according to international standards. Directory]. Moscow, Gosstandart Rossii Publ., 2001. 300 p.
31. *Polevoy opredelitel pochv* [Field determinant of soil]. Moscow, Soil Institute named after V.V. Dokuchaev Publ., 2008. 182 p.
32. *Geologicheskaya karta Tyumenskoy oblasti (yuzhnye rayony). Masshtab 1:2500000* [Geological map of the Tyumen region (southern areas). Scale 1:2500000]. Available at: [http://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/ufo/tyumenskaya\\_obl/](http://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/ufo/tyumenskaya_obl/) (accessed 12 January 2021).
33. Sudyko A.F. *Opredeleniye urana, toriya, skandiya i nekotorykh redkozemelnykh elementov v dvadtsati chetyrekh standartnykh obraztsakh sravneniya instrumentalnym neytronno-aktivatsionnym metodom* [Determination of uranium, thorium, scandium and some rare-earth elements in twenty-four standard reference samples by the instrumental neutron activation method]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proc. of the V International Conference]. Tomsk, 2016, pp. 620–624.
34. Revich B.A., Saet Yu.E., Smirnova R.S. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke stepeni zagryazneniya atmosfery vozdukh naseleennykh punktov metallami po ikh soderzhaniiyu v snezhnom pokrove i pochve (Utv. 15 maya 1990 g. № 5174-90)* [Guidelines for assessing the degree of air pollution of populated areas by metals according to their content in snow cover and soil (Approved. May 15, 1990 no. 5174-90)]. Moscow, IMGRE Publ., 1990. 16 p.
35. Bogatyrev L.G., Vasilevskaya V.D., Vladychenskiy A.S. *Pochvovedenie. V 2 ch. Ch. 2. Tipy pochv, ikh geografiya i ispolzovanie* [Soil Science. In 2 parts. P. 2. Types of soils, their geography and use]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 368 p.
36. Karetin L.N. *Pochvy Tyumenskoy oblasti* [Soils of the Tyumen region]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 286 p.
37. Gorshenkin K.P. *Pochvy yuzhnoy chasti Sibiri* [Soils of the southern part of Siberia]. Moscow, AN SSSR Publ., 1955. 592 p.
38. Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Kondratenok B.M. Assessment of background concentrations of heavy metals in soils of the northeastern part of European Russia. *Eurasian Soil Science*, 2007, vol. 40, no. 9, pp. 949–955. In Rus.
39. Vodyanitskiy Yu.N. *rol soedinyeniye zheleza v zakrepleni tyazhelykh metallov i metalloidov v pochvakh (obzor literatury)* [The role of iron compounds in the fixation of heavy metals and metalloids in soils (literature review)]. *Soil science*, 2010, no. 5, pp. 558–572.
40. Manceau A., Marcus M.A., Tamura N. Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. Applications of synchrotron radiation in low-temperature geochemistry and environmental science. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, vol. 49, pp. 341–428.
41. Saenko G.N. *Metally i galogeny v morskikh organizmakh* [Metals and halogens in marine organisms]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 200 p.
42. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov: spravochnik* [Ecological Geochemistry of Elements: handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 2558 p.
43. El Bilali L., Rasmussen P.E., Hall G.E.M., Fortin D. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments. *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, pp. 1171–1181.
44. Leuz A.-K., Monch H., Johnson C.A. Sorption of Sb (III) and Sb (V) to goethite: Influence on Sb (III) oxidation and mobilization. *Environmental Science & Technology*, 2006, vol. 40, pp. 7277–7282.

Received: 13 October 2021.

#### Information about the authors

**Vladislav V. Boev**, Cand. Sc., assistant, Tyumen State University.

**Natalia V. Baranovskaya**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Viktor A. Boev**, Cand. Sc., associate professor, Tyumen State University.

УДК 621.039.7

## ПОЛУЧЕНИЕ МАТРИЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНАТНОГО ПЕРОВСКИТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ АКТИНОИДОВ, МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Долматов Олег Юрьевич<sup>1</sup>,  
dolmatov@tpu.ru

Кузнецов Михаил Сергеевич<sup>1</sup>,  
kms@tpu.ru

Семенов Андрей Олегович<sup>1</sup>,  
semenov\_a\_o@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки способа получения перспективных минералоподобных матричных материалов, предназначенных для иммобилизации наиболее опасных с точки зрения захоронения высокорadioактивных отходов атомной промышленности. Применение технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения таких материалов является более ресурсосберегающим и не требует сложного технологического оборудования и проведения комплексных операций по сравнению с традиционными способами получения.

**Цель:** определить и предложить способ получения алюмината неодима в качестве матричного материала актиноидной фракции радиоактивных отходов.

**Объекты:** алюминат неодима  $NdAlO_3$  со структурой минерала перовскит; неодим, являющийся имитатором трёхвалентной фракции радиоактивных отходов.

**Методы:** оценка и анализ получения матричного материала путем компьютерного моделирования процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза; проведение лабораторных экспериментов по синтезу алюмината неодима; определение фазового состава разрабатываемого материала методом рентгенофазового анализа.

**Результаты.** Описана расчетно-теоретическая модель определения принципиальной возможности процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза матричного материала на основе алюмината неодима, предназначенного для иммобилизации высокоактивных радиоактивных отходов. Методы численного моделирования позволили рассмотреть различные реакции синтеза такого материала и определить максимально возможное количество включения имитатора трехвалентных актиноидов. Так, для получения  $NdAlO_3$  необходимо использовать СВС-реакцию образования алюминий-никеля с дополнительным включением не более 46 мас. % системы  $Nd_2O_3-Al_2O_3$  (соотношение компонентов оксидов 3,3:1) в исходную шихту смеси. Базируясь на результатах разработанной модели, было проведено экспериментальное исследование по синтезу матричного материала. Определены оптимальные условия подготовки шихты компонентов: плотность исходной системы не должна превышать 5,29 г/см<sup>3</sup>, что соответствует давлению прессования 40 МПа; максимально возможное включение  $Nd_2O_3-Al_2O_3$  в систему Ni-Al – не более 40 мас. %. Проведенный рентгенофазовый анализ показал наличие фазы алюмината неодима во всех синтезируемых образцах, максимальная доля  $NdAlO_3$  достигается при синтезе образца с 40 мас. % добавки  $Nd_2O_3-Al_2O_3$  и давлением прессования 30 МПа. Таким образом, использование ресурсоэффективной и простой технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза позволяет получить надежный матричный материал для иммобилизации радиоактивных отходов.

### Ключевые слова:

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез, перовскит, ядерные отходы, иммобилизация, актиноиды.

### Введение

Атомные электростанции, как и любой другой объект энергетики, постоянно генерируют отходы, при этом их количество значительно ниже по сравнению с отходами других видов производства тепловой электроэнергии. Тем не менее активное развитие ядерных программ может привести к существенному накоплению наиболее опасных для человека и всей биосферы в целом высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) [1]. Как правило, основным источником таких отходов являются продукты деления и трансурановые элементы, образующиеся в процессе кампании ядерной энергетической установки. Количество ВАО составляет лишь 3 % от общего объема всех отходов атомной энергетики, но в то же время их активность достигает 95 % от суммарной активности

[2, 3]. Таким образом, необходимость в изоляции наиболее долгоживущих и биологически опасных нуклидов из окружающей среды становится главной задачей обращения с радиоактивными отходами.

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов иммобилизации ВАО является применение технологии остекловывания [2–4]. Используемые силикатные и фосфатные стекла представляют собой аморфные материалы с топологически неупорядоченной структурой. Отрицательным аспектом их использования является тот факт, что стекла не могут гарантировать стабильность и надежность консервации актиноидной фракции в течение нескольких тысяч лет в процессе долговременного хранения вследствие их химической нестабильности и тенденции к спонтанной кристаллизации при повышении температур.



Альтернативными материалами для иммобилизации являются кристаллические матрицы – синтетические аналоги природных геологических минералов. Такие соединения (перовскит, монацит, цирконолит, пироксид и др.) способны длительное время надежно содержать высокоактивные фракции радиоактивных отходов [5, 6]. Тем не менее данные материалы не получили широкого применения в связи с отсутствием промышленной технологии синтеза, а существующие методы, такие как индукционная плавка, плазменное и микроволновое плавление, сопровождаются сложными технологическими процессами получения и высокими энергетическими затратами.

Наилучшей технологией изготовления иммобилизационных матриц может являться самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Преимуществами СВС являются возможность получения материалов с заданными свойствами, высокая чистота конечного продукта, низкое энергопотребление и возможность контролировать все стадии процесса синтеза [7–9].

Таким образом, целью данной работы является получение матричного материала перовскитного типа

методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

#### Постановка задачи

Реакция получения алюмината неодима протекает по следующему уравнению:



В данном случае Nd является имитатором трехвалентной актиноидной фракции (Pu, Am, Cm, и др.) радиоактивных отходов вследствие близости ионных радиусов и, как следствие, схожести химических свойств неодима и актиноидов.

Объединенным количественным критерием принципиальной осуществимости процесса получения химического соединения, позволяющего выяснить степень протекания и трансформации начальных реагентов реакции в конечный продукт, является энергия Гиббса  $\Delta G^\circ$ . Определение значения стандартной энергии Гиббса реакции (1) базировалось на полуэмпирическом подходе, предложенном О. Фабричной и Г. Зайферта [10, 11], а также С. Хуангом и О. Ван дер Бистом [12] (табл. 1). Такой метод показывает достаточно хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными.

Таблица 1. Фазовое описание системы  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$

Table 1. Phase description of the  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  system

Фаза/Phase	Подрешеточная модель Sublattice model	Полуэмпирическая формула расчета $\Delta G^\circ$ Semi-empirical formula for calculation $\Delta G^\circ$
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	$(\text{Nd}^{+3})_2(\text{O}^{2-})_3$	$\Delta G^\circ(\text{Nd}_2\text{O}_3) = -1847329 + 637,424 \cdot T - 116,358 \cdot T \cdot \ln(T)$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$(\text{Al}^{+3})_2(\text{O}^{2-})_3$	$298,14 > T > 600:$ $\Delta G^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3) = -1707351 + 448,021 \cdot T - 67,4804 \cdot T \cdot \ln(T) - 0,06747 \cdot T^2 + 1,4205433 \cdot 10^{-5} T^3 + 938780/T$ $600 > T > 1500:$ $\Delta G^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3) = -1724886 + 754,856 \cdot T - 116,258 \cdot T \cdot \ln(T) - 0,0072257 \cdot T^2 + 2,78532 \cdot 10^{-7} T^3 + 2120700/T$ $1500 > T > 3000:$ $\Delta G^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3) = -1772163 + 1053,454 \cdot T - 156,058 \cdot T \cdot \ln(T) + 0,007091 \cdot T^2 - 6,29402 \cdot 10^{-7} T^3 + 12366650/T$
$\text{NdAlO}_3$	$(\text{Nd}^{+3})(\text{Al}^{+3})(\text{O}^{2-})_3$	$\Delta G^\circ(\text{NdAlO}_3) = 0,5 \cdot \Delta G^\circ(\text{Nd}_2\text{O}_3) + 0,5 \cdot \Delta G^\circ_{\text{corund}} - 41197 - 15,794 \cdot T$

Графическая зависимость энергии Гиббса от температуры, в соответствии с описанными выше полуэмпирическими выражениями, для системы  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  представлена на рис. 1.

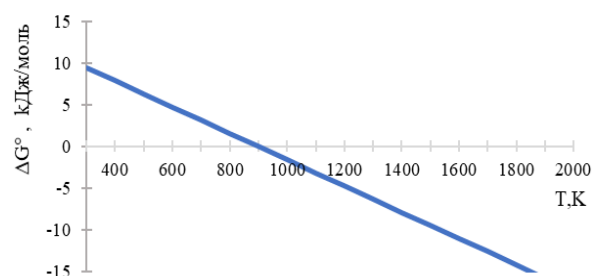


Рис. 1. Зависимость энергии Гиббса образования алюмината неодима, рассчитанной в соответствии с полуэмпирическими зависимостями

Fig.1. Dependence of Gibbs energies of the neodymium aluminate formation calculated by semi-empirical formulas

Как видно из графика, реакция получения алюмината неодима возможна лишь при температуре около

900 К и выше, что достаточно точно согласуется с экспериментальными данными ряда работ по синтезу  $\text{NdAlO}_3$  [13].

#### Расчетно-теоретическая модель получения алюмината неодима

Для осуществления процесса синтеза методом СВС необходимо, чтобы рассматриваемая реакция была экзотермической, так как только для данного рода реакций наблюдается процесс распространения фронта горения в автоволновом режиме, при котором выделяющееся тепло передается от слоя к слою путем теплопередачи. Следовательно, необходимо использование дополнительной СВС-реакции с большим энергетическим выходом, при которой часть тепла будет поглощаться системой  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  для необходимого разогрева исходных оксидов и последующего образования алюмината неодима.

Выбор композиции должен определяться не только энергетическим выходом реакции синтеза, но и комплексом свойств образующегося соединения, обеспечивающего практическую полезность его применения в качестве матричного каркаса. Так, напри-

мер, многие силициды имеют высокую жаростойкость, бориды повышают стойкость к износу, станииды обладают сверхпроводящими свойствами и т. д.

Другими критериями выбора являются минимизация количества образующихся фазовых составляющих продуктов и наличие температур плавления, существенно ниже развивающихся в процессе синтеза температур. Плавление фазовых компонентов позволяет достигать появления жидкостных фаз в структуре продуктов, а затем, в процессе остывания и затвердевания, создания дополнительного упрочняющего каркаса. Таким образом, синтезируется матричный материал, представляющий собой блок с диспергированными фазовыми составляющими.

Кроме того, температура синтеза не должна превышать температуру плавления алюмината неодима (2489 К) более чем на 100 К, так как при дальнейшем повышении температуры возможно его разложение [14]. Количество компонентов и их элементарный состав не должны оказывать сильного эффекта на гидrolитические свойства матрицы на основе алюмината неодима.

Наиболее распространенные СВС-реакции с большим энергетическим выходом и подходящие к вышеописанным критериям представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** СВС-реакции с высоким энергетическим выходом [15, 16]

**Table 2.** SHS-reactions with high-energy yield [15, 16]

Реакция/Reaction	Q, кДж/г (кДж/г)
Ti+2B=TiB <sub>2</sub>	4,02
V+2B=VB <sub>2</sub>	2,81
Ti+C=TiC	3,08
Ti+2Si=TiSi <sub>2</sub>	1,31
Zr+N=ZrN	3,41
Ni+Al=NiAl	1,37

Диборид титана обладает исключительной твердостью, устойчив в водных и кислотных растворах, в процессе окисления на его поверхности образуется стекловидная пленка, являющаяся дополнительным барьером к процессам выщелачивания [17, 18]. VB<sub>2</sub>, как и всем боридам пятой группы, присущи высокая химическая и гидrolитическая стойкость, твердость, механическая прочность [19]. Высокие температуры плавления и теплота образования карбида титана (3260 °С и 184,76 кДж/моль соответственно [20]) служат доказательством его стабильности. TiC, как и TiSi<sub>2</sub>, устойчивы к агрессивным средам, коррозионностойки, что обеспечивает их широкое применение в различных областях науки и техники [21]. Нитрид циркония – материал с высокой твердостью, имеет высокую устойчивость к процессам выщелачивания и износу [22]. NiAl обладает низкой плотностью, высокой температурой плавления, хорошей стойкостью к окислению и коррозии. При синтезе NiAl возможно получение дополнительных фаз – Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub>, Ni<sub>3</sub>Al, значительно повышающих его прочностные характеристики вследствие искажения кристаллической решетки [20].

Таким образом, предложенные соединения, с одной стороны, являются конечными продуктами СВС-реакций с необходимым энергетическим выходом,

направленным на образования NdAlO<sub>3</sub>, а с другой стороны, могут способствовать улучшению характеристик синтезируемой матрицы.

Особое влияние при реализации реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза имеет связь максимальной температуры процесса горения с начальной температурой системы и количеством включения в нее различных продуктов. Так, например, при превышении некоторого предельного значения содержания добавки реакция синтеза может вообще не реализоваться или «погаснуть» в процессе синтеза. Следовательно, при исследовании применимости реакций, представленных в таблице, необходимо учитывать также и критерии осуществления СВС-реакций.

Как правило, существующие модели, характеризующие кинетику процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, описывают довольно элементарные одностадийные случаи. Невозможность воссоздания поведения всех протекающих реакций в волне горения в единице объема реальных систем накладывает существенные ограничения при анализе процесса СВС.

Недостаточность расчетных данных, характерная для создания новых перспективных материалов с заданными свойствами, синтезируемыми в случае реализации многостадийных реакций, также является дополнительным лимитирующим фактором определения параметров твердофазного горения.

Выходом из создавшегося положения является проведение термодинамического анализа, в частности предварительный термодинамический расчет адиабатической температуры горения –  $T_{ад}$ .

Так, результаты экспериментальных исследований СВС-процессов показали, что при:

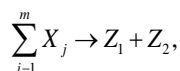
- $T_{ад} < 1500$  К горение не осуществимо для любых систем;
- $T_{ад} > 2000$  К системы всегда горят;
- $1500 \text{ К} < T_{ад} < 2000$  К горение может как осуществляться, так и не осуществляться, необходимы дополнительные исследования [23].

Пусть в результате самораспространяющегося высокотемпературного синтеза образуются полностью прореагировавшие продукты реакции и энергия реакции в виде выделяющегося тепла расходуется на изменение начальной температуры до значения температуры адиабатической. Из равенства энтальпий продуктов реакции при адиабатической температуре  $T_{ад}$  и начальных реагентов при температуре инициирования  $T_0$  следует [24], что:

$$\sum_{i=1}^n [H(T_{ад}) - H(T_0)] = Q, \quad (2)$$

где  $H(T_{ад})$  и  $H(T_0)$  – энтальпии продуктов при адиабатической и начальной температурах;  $Q$  – теплота реакции, выделяемая в процессе синтеза. Суммирование следует проводить по всем образующимся в реакции продуктам. Величина энергетического эффекта рассчитывается в соответствии со значениями стандартных энтальпий образования.

Рассмотрим случай реализации прохождения реакции при образовании двух конечных продуктов в соответствии со следующей схемой:



где  $X_1$  – исходный компонент  $j$ -го сорта;  $Z_1$  – продукт СВС-реакции, который при  $T_{ад}$  также в общем случае может находиться как в твердой, так и в жидкой фазе;  $Z_2$  – продукт, полученный в результате включения дополнительных реагентов в исходную систему.

Исходя из того, что исходные компоненты взаимодействуют полностью, соотношение между продуктами можно определить в соответствии со стехиометрией уравнения.

Для представленной схемы осуществления процесса синтеза исходное уравнение (2) принимает вид:

$$\int_{T_0}^{T_{ад}} c(T)dT = (1-x)(Q-vM) - xL, \quad (3)$$

где  $c(T)$  – температурная зависимость теплоемкости продукта реакции СВС;  $L$  – величина теплового эффекта образования продукта  $Z_2$  из компонентов-разбавителей;  $x$  – доля содержания дополнительных продуктов-компонентов в исходной шихте (массовая, объемная или мольная в зависимости от используемых единиц измерения величин  $c(T)$ ,  $Q$ ,  $M$ );  $M$  – теплота плавления продукта  $Z_1$ ;  $v$  – доля жидкой фазы в конечном продукте  $Z_1$ , причем:

$$v=0 \text{ если } T_{пл} > T_{ад};$$

$$v=1 \text{ если } T_{пл} < T_{ад},$$

где  $T_{пл}$  – температура плавления продукта.

Для выявления влияния процесса плавления первой компоненты  $Z_1$  на протекание СВС необходимо определить взаимосвязь адиабатической температуры с температурой плавления и рассчитать параметр [24]:

$$\Delta H(T_{пл}) = \int_{T_0}^{T_{пл}} c(T)dT,$$

и сравнить ее с величинами  $Q$  и  $Q-M$ .

В случае, если:

- $\Delta H(T_{пл}) > Q$ , то  $T_{пл} > T_{ад}$ ;
- $\Delta H(T_{пл}) < Q-M$ , то  $T_{пл} < T_{ад}$ , наблюдается полное плавление продукта.

Если же  $Q-M < \Delta H(T_{пл}) < Q$ , то  $T_{пл} = T_{ад}$ , происходит частичное плавление компонента, коэффициент  $v$  необходимо находить из следующего выражения:

$$v = \frac{Q - \Delta H(T_{пл})}{M}.$$

Решение уравнения (3) позволяет определить зависимость адиабатической температуры  $T_{ад}$  от параметров подготовки исходной шихты, т. е. степени содержания добавки в исходной системе  $x$  и температуры инициирования реакции  $T_0$ , а также проанализировать вероятность осуществления процесса горения в системах с образованием двух продуктов реакции в соответствии с вышеописанными численными критериями.

#### Экспериментальное получение алюмината неодима

Синтез матричных материалов методом СВС осуществлялся по следующей схеме (рис. 2).

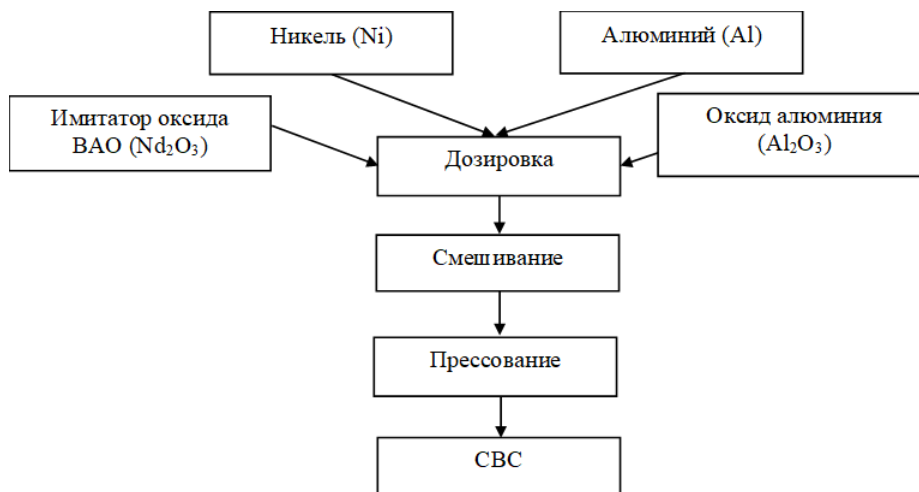


Рис. 2. Схема получения матричного материала

Fig. 2. Scheme of matrix material production

Подготовка шихты для проведения процесса синтеза осуществлялась следующим образом. На первом этапе исходные реагенты: оксиды алюминия и актиноида (неодима), промышленно изготовленные порошки алюминия и никеля, дозировались весовым методом из расчета осуществления процесса СВС NiAl с образованием алюмината неодима: Al и Ni –

31,5 и 68,5 масс. % соответственно; к ним добавляется  $x$  масс. % добавки оксидов актиноида и алюминия. При этом дозировка оксидов осуществлялась в соотношении: 3,3:1. На следующем этапе полученная смесь помещалась в шнековый смеситель штырькового типа AR 403 All-Purpose Equipment (Германия) с насадкой из металлического вращающегося куба для

осуществления равномерного перемешивания. По истечении 30 минут полученная шихта извлекалась и помещалась в цилиндрическую пресс-форму диаметром 25 мм. Прессование выполнялось с помощью гидравлического лабораторного прессы ПГЛ-12 (максимальное давление 50 МПа на поверхность площадью 30 см<sup>2</sup>) с целью получения образцов разной плотности при вариации давления от 10 до 40 МПа с шагом в 10 МПа. Время выдержки составляло 1 час. На следующем этапе шихта извлекалась из пресс-форм и помещалась в СВС-реактор для прогрева образцов и осуществления СВС. Детектирование температур осуществлялось с помощью вольфрам-рениевых термопар, подключенных к многоканальному счетчику импульсов Овен СИ8. Синтез осуществлялся в условиях остаточного давления 300 Па.

Фазовый анализ полученных образцов матричного материала осуществлялся на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000 с использованием CuK $\alpha$ -излучения.

### Результаты и обсуждение

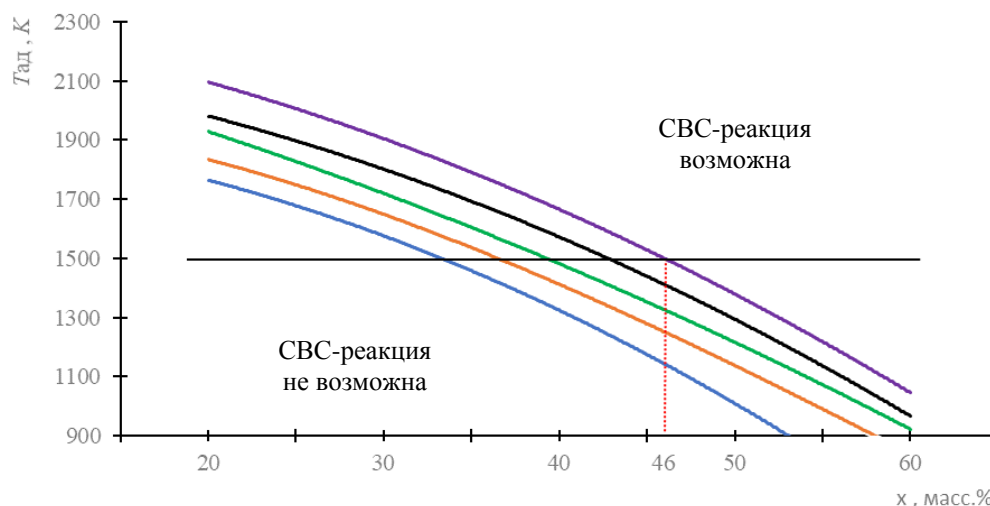
Рассмотрим реакцию образования алюмината неодима с помощью СВС-реакции получения NiAl.

Для определения расчетно-теоретической возможности получения композиционных материалов на основе алюмината неодима в режиме технологического горения исходные реагенты смешиваются в весовых соотношениях в соответствии с осуществлением следующей реакции:



Так как расчет предполагает, что потери массы системой в процессе синтеза отсутствуют, то можно утверждать, что сохранность массовых соотношений между составляющими сложной системы до и после синтеза соблюдается. Массовая доля  $x$  – содержание компонентами оксидов неодима и алюминия в весовом соотношении 3,3:1 в исходной шихте СВС-реакции.

При реализации численных экспериментов рассматривалась зависимость адиабатической температуры горения данной системы от содержания количества включения  $x$  системы Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в исходную шихту компонентов (рис. 3). На рис. 4 показано влияние температуры предварительного подогрева на развитие адиабатической температуры в процессе синтеза, рассчитанная в соответствии с уравнением (4).



—  $T_0=300$  К; —  $T_0=400$  К; —  $T_0=500$  К; —  $T_0=600$  К; —  $T_0=700$  К

Рис. 3. Расчетно-теоретическая зависимость адиабатической температуры  $T_{ад}$  от количества содержания добавки Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $x$  в исходной шихте при осуществлении СВС-реакции образования NiAl и варьировании температуры предварительного подогрева  $T_0$

Fig. 3. Calculated theoretical dependence of adiabatic temperature  $T_{ад}$  on amount of additive content Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $x$  for SHS-reaction of NiAl during varying the preheating temperature  $T_0$

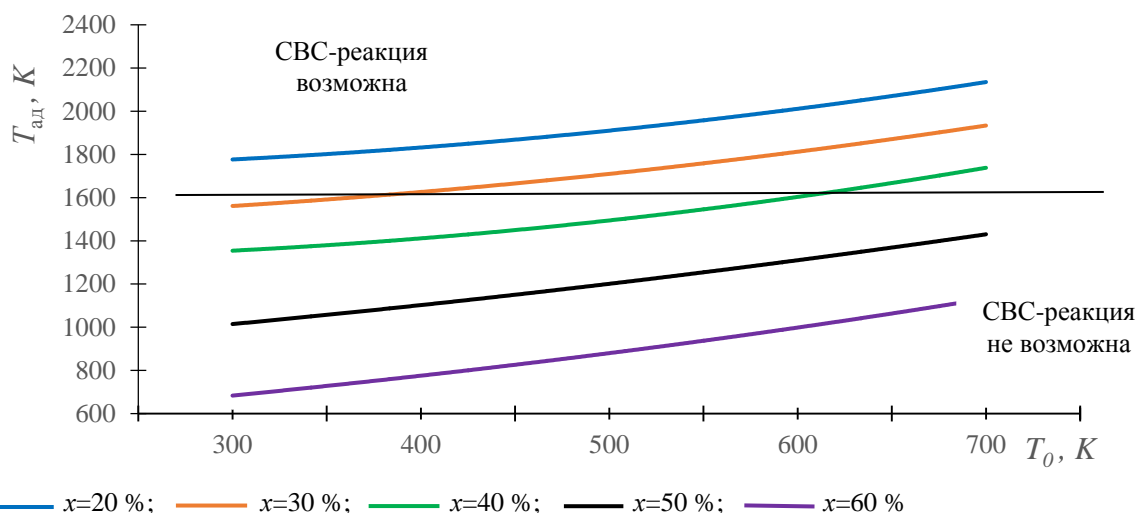
Анализ расчетных зависимостей  $T_{ад}$  от перечисленных выше параметров показал, что для системы, включающей долю компоненты Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выше 46 мас. % ( $x=46$  %), горение не реализуется при всех вариациях изменяемых параметров (температуре предварительного подогрева 700 К). При исследовании влияния температуры предварительного подогрева на изменение  $T_{ад}$  было установлено, что процесс горения возможен без предварительного подогрева, но с количеством добавки не более 34 мас. % ( $T_0=300$  К).

Аналогичным методом был произведен термодинамический расчет адиабатической температуры для реакций, описанных в табл. 3.

При реализации реакций синтеза TiB<sub>2</sub>, TiC и ZrN методом СВС развиваемые адиабатические температуры значительно выше порогового значения температуры (~2600 К), при которой возможно разложение алюмината неодима на составляющие оксиды.

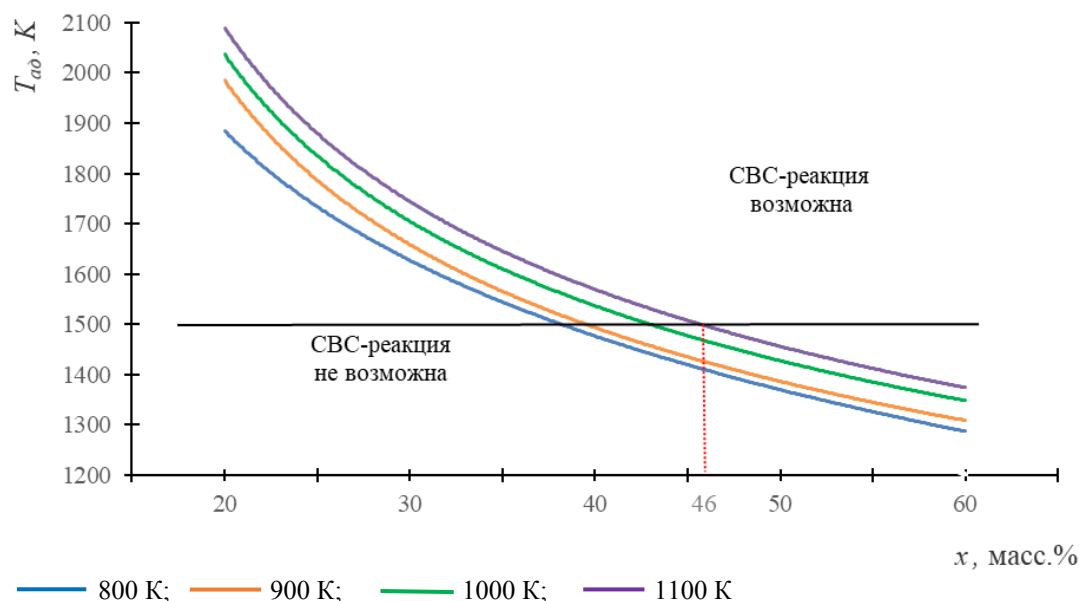
СВС VB<sub>2</sub> (рис. 5) с включением в исходную систему около 46 мас. % Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> требует достижения высоких температур подогрева (выше 1100 К) и значительных энергозатрат. Снижение температуры

до 800 К позволит надежно иммобилизовать не более 39 мас. % добавки.



**Рис. 4.** Расчетно-теоретическая зависимость адиабатической температуры  $T_{ad}$  от температуры предварительного подогрева  $T_0$  для СВС реакции образования NiAl и варьировании количества содержания добавки  $Nd_2O_3-Al_2O_3$   $x$  в исходной шихте

**Fig. 4.** Calculated theoretical dependence of adiabatic temperature  $T_{ad}$  on the preheating temperature  $T_0$  for SHS-reaction of NiAl during varying amount of additive content  $Nd_2O_3-Al_2O_3$   $x$  in the initial mixture



**Рис. 5.** Расчетно-теоретическая зависимость адиабатической температуры  $T_{ad}$  от количества содержания добавки  $Nd_2O_3-Al_2O_3$   $x$  для СВС-реакции образования  $VB_2$  и варьировании температуры предварительного подогрева  $T_0$

**Fig. 5.** Calculated theoretical dependence of adiabatic temperature  $T_{ad}$  on amount of additive content  $Nd_2O_3-Al_2O_3$   $x$  for SHS-reaction of  $VB_2$  during varying the preheating temperature  $T_0$

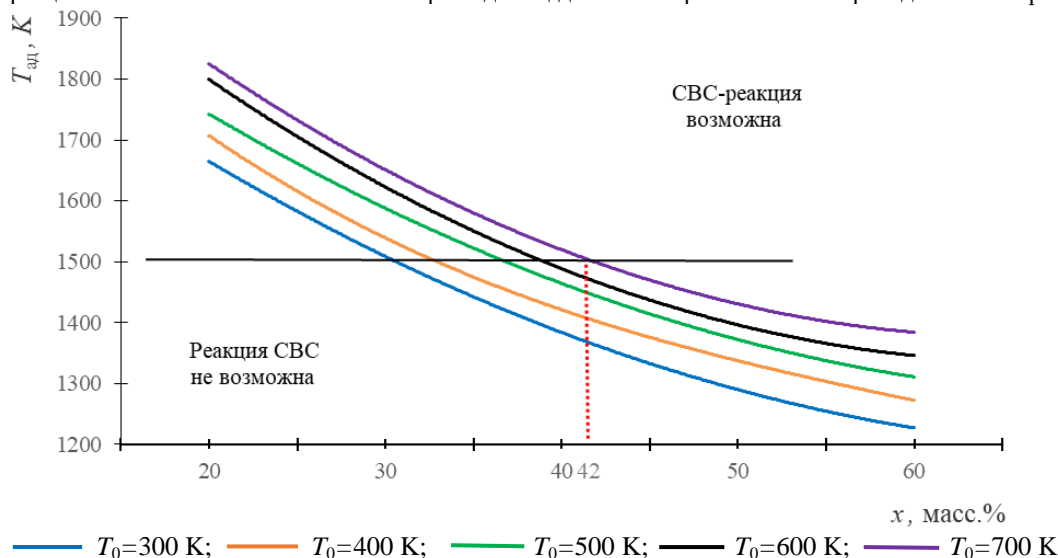
Максимально возможное включение добавки при синтезе  $TiSi_2$  (рис. 6) составляет не более 42 мас. % при температуре подогрева около 700 К. Для реакции синтеза NiAl предельное включение  $Nd_2O_3-Al_2O_3$  равно 46 мас. % при температуре предварительного подогрева 700 К.

Из этого следует, что использование реакции синтеза NiAl в режиме технологического горения для получения матричного материала, содержащего алюминат неодима, является наиболее приемлемым среди рассмотренных.

Лабораторные эксперименты по синтезу матричного материала на основе алюмината неодима осуществлялись в соответствии с вышеописанной методикой.

По результатам численного моделирования была проведена серия экспериментов (табл. 3) по получению матричного материала с целью исследования влияния плотности шихты компонентов и степени включения имитатора отходов  $Nd_2O_3$  на процесс синтеза и фазовый состав конечного продукта. Все об-

разцы изготавливались в количестве трех единиц для набора статистики проведения экспериментов.



**Рис. 6.** Расчетно-теоретическая зависимость адиабатической температуры  $T_{ад}$  от количества содержания добавки  $Nd_2O_3-Al_2O_3$   $x$  для СВС-реакции образования  $TiSi_2$  и варьировании температуры предварительного подогрева  $T_0$

**Fig. 6.** Calculated theoretical dependence of adiabatic temperature  $T_{ad}$  on amount of additive content  $Nd_2O_3-Al_2O_3$   $x$  for SHS-reaction of  $TiSi_2$  during varying the preheating temperature  $T_0$

**Таблица 3.** Параметры подготовки шихты компонентов перед проведением СВС

**Table 3.** Preparation parameters of batch before carrying out SHS

Номер образца Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Давление прессования $P$ , МПа Pressure $P$ , МПа	10			20			30			40		
Среднее значение плотности образцов $\rho$ , г/см <sup>3</sup> Average value of sample density $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	4,86	4,90	4,93	5,07	5,04	5,02	5,18	5,16	5,14	5,29	5,33	5,32
Включение добавки $Nd_2O_3-Al_2O_3$ , мас. % Inclusion of $Nd_2O_3-Al_2O_3$ additive, wt. %	30	40	50	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Характер волны горения в процессе СВС* Behavior of the combustion wave during SHS*	+	+	-	+	+	-	+	+	-	□	□	-

\*Примечание: «+» – устойчивое распространение волны горения; «-» – затухание волны горения в процессе синтеза; «□» – нестационарное поведение волны горения с последующим термомеханическим разрушением образцов.

\*Note: «+» – stable propagation of the combustion wave; «-» – attenuation of the combustion wave during synthesis, «□» – unstable behavior of the combustion wave with subsequent thermomechanical destruction of the samples.

В результате проведения СВС было установлено, что при нагреве исходных образцов № 3, 6, 9, 12 наблюдаются локальные очаги горения без разрастания в волну с последующим затуханием реакции синтеза вне зависимости от плотности шихты, что обусловлено излишним содержанием добавки и повышенными энергетическим затратами на осуществление реакции синтеза алюмината неодима.

При синтезе образцов № 10, 11 наблюдается термомеханическое разрушение и нестационарность процесса распространения волны горения вследствие избыточной плотности исходной шихты и резкого удельного энергетического выхода реакций, протекающих в единице объема образца.

В процессе нагрева образцов № 1, 2, 4, 5, 7, 8 до температур 650–750 К (вследствие различных харак-

теристик начальной шихты компонентов реакции) происходит инициирование волны горения на торце с последующим развитием по всему объему образцу, наблюдается стремительный скачок температуры со стабилизацией в районе 1600–1950 К, то есть процесс синтеза протекает практически в изотермическом режиме. В дальнейшем образцы остывали до температуры окружающей среды.

В соответствии с полученными данными наблюдается достаточная согласованность между результатами численного и лабораторного экспериментов по определению влияния содержания добавки  $Nd_2O_3-Al_2O_3$  в системе Ni-Al на синтез матричного материала на основе алюмината неодима (отклонение составляет не более 6 %).

Результаты рентгенофазового анализа полученных образцов представлены в табл. 4. Все синтезируемые образцы вне зависимости от условий подготовки исходной шихты включают в себя наличие фазы алюмината неодима  $\text{NdAlO}_3$  от 16,7 до 39,5 мас. %. Максимальная доля перовскита достигается при синтезе образца с 40 мас. % добавки  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  и давлением прессования 30 МПа.

**Таблица 4.** Результаты РФА синтезированных образцов  
**Table 4.** XRD results of the synthesized samples

Образец Sample	P, МПа (MPa)	x, мас. % (wt. %)	Фазовый состав, мас. % Phase composition, wt. %					
			$\text{Nd}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Ni}_2\text{Al}_3$	$\text{NiAl}_3$	$\text{NiAl}$	$\text{NdAlO}_3$
1	20	20	2,2	7,3	33,3	17,1	23,3	16,7
2	30	20	2,5	4,6	30,4	2,4	32,7	27,4
4	20	30	2,9	6,5	31,8	13,8	25,3	19,7
5	30	30	4,7	3,9	26,2	1,1	28,2	35,8
7	20	40	8,3	6,9	26,3	14,2	19,8	24,5
8	30	40	3,8	5,7	26,8	–	24,2	39,5

Во всех образцах наблюдаются фазы непрореагировавших реагентов вне зависимости от приложеного давления прессования и плотности в количестве:  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  2,2 – 8,3 масс. %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  3,9 – 7,3 масс. % При увеличении содержания количества разбавителя  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  в системе исходных реагентов Ni-Al доля непрореагировавших продуктов возрастает при одном и том же значении плотности. Тем не менее повышенные давления прессования позволяет сместить фазообразование в сторону содержания алюмината неодима вследствие роста площади контакта между частицами реагентов внутри шихты компонентов. Увеличение содержания количества оксидных фракций, то есть повышение содержания разбавителей в

исходной шихте, приводит к росту фазообразования  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  и  $\text{NiAl}_3$  вследствие понижения температуры синтеза и увеличения энергопотерь на образование алюмината неодима.

Кроме всего прочего, включение дополнительных фаз алюминий-никеля  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  и  $\text{NiAl}_3$  с искаженными кристаллическими решетками по сравнению с  $\text{NiAl}$  в конечный синтезируемый продукт должно привести к увеличению прочностных свойств матричного материала.

#### Выводы

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана расчетно-теоретическая модель самораспространяющегося высокотемпературного синтеза матричного материала на основе алюмината неодима с учетом максимально возможного включения актиноидной фракции радиоактивных отходов.
2. Определены основные условия синтеза иммобилизационной матрицы  $\text{NdAlO}_3$  путем включения компонентов имитатора высокоактивных отходов в исследуемую реакцию получения алюминий-никеля: содержание включения в исходную систему оксидов  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  не должно превышать 46 мас. % (весовое соотношение 3,3:1) при температуре предварительного подогрева 700 К.
3. Лабораторные эксперименты по получению матричного материала показали наличие фазы алюмината неодима во всех образцах. Максимальная доля перовскита достигается при синтезе образца с 40 мас. % добавки  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  (весовое соотношение 3,3:1) и давлением прессования 30 МПа.
7. Self-propagating high-temperature synthesis of ceramic matrices for immobilization of actinide-containing wastes / T.V. Barinova, K.B. Podbolotov, I.P. Borovinskaya, A.S. Shchukin // Radiochemistry. – 2014. – V. 56. – P. 554–559. URL: <https://doi.org/10.1134/S1066362214050178> (дата обращения 15.08.2021).
8. Производство порошковых тугоплавких продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в режиме непрерывного горения / С.М. Гайдар, В.Д. Жигарев, А.А. Волков, М.Ю. Карелина // Технология металлов. – 2017. – № 7. – С. 37–41.
9. Activation of the technological combustion process of oxide systems by different modifying additives / Z.A. Mansurov, N.N. Mofa, B. S. Sadykov, T.A. Shabanova // Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 2013. – V. 2. – № 3. – P. 106–112.
10. Fabrication O., Seifert H.J. Assessment of thermodynamic functions in the  $\text{ZrO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  system // Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 2008. – V. 32. – № 1. – P. 142–151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2007.07.002> (дата обращения 15.08.2021).
11. Phase equilibria and thermodynamics in the  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ -system / O. Fabricznaya, H.J. Seifert, R. Weiland, T. Ludwig, F. Aldinger, A. Navrotsky // Zeitschrift für Metallkunde. – 2001. – V. 92. – P. 1083–1097.
12. Estimation of the phase diagram for the  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$  system / L. Li, O. Van der Biest, P. Wang, J. Vleugels, W. Chen, S. Huang // Journal of the European Ceramic Society. – 2001. – V. 21. – P. 2903–2910.
13. Synthesis of a  $\text{NdAlO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic-ceramic composite by single-source precursor CVD / M. Veith, S. Mathur, N. Lecerf,

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J. Nuclear fuel reprocessing and waste management. – Singapore: World Scientific Publishing Company, 2018. – 279 p. URL: <https://doi.org/10.1142/11017> (дата обращения 15.08.2021).
2. Theodore M.K., Theodore L. Introduction to environmental management. – Boca Raton: CRC Press, 2021. – 556 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003171126> (дата обращения 15.08.2021).
3. Colburn H.A., Peterson R.A. A history of Hanford tank waste, implications for waste treatment, and disposal // Environmental Progress and Sustainable Energy. – 2021. – V. 40. – 12 p. URL: <https://doi.org/10.1002/ep.13567> (дата обращения 15.08.2021).
4. Solberg-Johansen B. Life cycle assessment of the nuclear fuel cycle. – London: Academic Press, 1998. – 349 p.
5. Investigating hollandite-perovskite composite ceramics as a potential waste form for immobilization of radioactive cesium and strontium / J. Ma, Z. Fang, X. Yang, B. Wang, F. Luo, X. Zhao, X. Wang, Y. Yang // Journal of Materials Science. – 2021. – V. 56. – P. 9644–9654. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05886-2> (дата обращения 15.08.2021).
6. High-entropy  $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ -type oxide ceramics: a potential immobilising matrix for high-level radioactive waste / L. Zhou, F. Lia, J. Liu, S. Sun, Y. Liang, G. Zhang // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – V. 415. – 9 p. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125596> (дата обращения 15.08.2021).

- K. Bartz, M. Heintz, V. Huch // *Chemistry of Materials*. – 2000. – V. 12. – № 2. – P. 271–274. URL: <https://doi.org/10.1021/cm991149g> (дата обращения 15.08.2021).
14. Shackerfold J.F., Doremus R.H. *Ceramic and glass materials: structure, properties, processing*. – New York: Springer, 2008. – 201 p.
15. Ункс К.Е. Термодинамические свойства 65 элементов и их оксидов, галогенидов, карбидов и нитридов – М.: Металлургия, 1965. – 126 с.
16. Wang Y., Liu Z.K., Chen L.Q. Thermodynamic properties of Al, Ni, NiAl and Ni<sub>3</sub>Al from first-principles calculations // *Acta Material*. – 2004. – V. 52. – P. 2665–2671.
17. Greenwood N., Parish R., Thornton P. Some reaction of metal borides // *Journal of the Chemical Society*. – 1985. – V. 66. – P. 545–549.
18. Кугай Л.Н., Назарчук Е.Н. Химическая устойчивость боридов переходных металлов // *Порошковая металлургия*. – 1971. – № 3. – С. 51–56.
19. Модылевская К.Д., Самсонов Г.В. Стойкость боридов переходных металлов против действия кислот и щелочей // *Украинский Химический Журнал*. – 1985. – Т. 25. – С. 55–59.
20. Осинцев О.Е. *Металловедение тугоплавких металлов и сплавов на их основе*. – М.: Машиностроение, 2021. – 156 с.
21. Mojaki S.C., Mishra S.B., Mishra A.K. Synthesis, characterization and material properties of titanium carbide nanocomposite derived from biochar // *Materials Letters*. – 2020. – V. 264. – 5 p. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127317> (дата обращения 15.08.2021).
22. Solid-state synthesis of zirconium nitride and hafnium nitride powders / Z. Wu, Z. Chen, L. Wang, L. Fang, T. Zhou, T. Mei, C. Zhang, Q. Li // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. – 2021. – V. 129. – P. 200–203. URL: <https://doi.org/10.2109/jcersj2.20177> (дата обращения 15.08.2021).
23. Рогачев А.С., Мукасян А.С. *Горение для синтеза материалов. Введение в структурную макрокинетику*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 400 с.
24. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е.А. Левашов, А.С. Рогачев, В.В. Курбаткина, Ю.М. Максимов, В.И. Юхвид. – М.: НИТУ МИСиС, 2011. – 377 с.

Поступила 13.10.2021 г.

#### Информация об авторах

**Долматов О.Ю.**, кандидат физико-математических наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кузнецов М.С.**, кандидат технических наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Семенов А.О.**, старший преподаватель отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 621.039.7

## DEVELOPMENT OF MATRIX MATERIAL BASED ON ALUMINATE PEROVSKITE FOR IMMOBILIZATION OF ACTINIDES BY SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

Oleg Yu. Dolmatov<sup>1</sup>,  
dolmatov@tpu.ru

Mikhail S. Kuznetsov<sup>1</sup>,  
kms@tpu.ru

Andrey O. Semenov<sup>1</sup>,  
semenov\_ao@tpu.ru

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

**The relevance** of the research is determined by the need to develop the method for obtaining mineral-like matrix materials intended for immobilization of the most hazardous radioactive waste of the nuclear industry. The use of the self-propagating high-temperature synthesis technology to obtain such materials is more resource-saving and does not require complex technological equipment and operations compared to traditional ways of production.

**The main aim** of the research is to define and propose a method for producing neodymium aluminate as a matrix material for the actinide fraction of radioactive waste.

**Objects** of the research are neodymium aluminate  $\text{NdAlO}_3$  with the structure of the mineral perovskite, which is used as an imitator of the trivalent fraction of radioactive waste.

**Methods:** evaluation and analysis of the matrix material creation by computer modeling of the self-propagating high-temperature synthesis; laboratory experiments on the synthesis of neodymium aluminate; determination of the morphological composition of the material by XDR phase analysis

**Results.** The paper describes a theoretical and simulation model for determining the fundamental possibility of the self-propagating high-temperature synthesis of a matrix material based on neodymium aluminate, intended for immobilization of high-level radioactive waste. Numerical simulation methods allowed us to consider various synthesis reactions of such material and determine the maximum possible amount of inclusion of a trivalent actinide simulator. Thus, it is necessary to use the reaction of SH-synthesis of aluminum-nickel with an additional content of no more than 46 wt. % of  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  (oxide component ratio of 3,3:1) system in the initial mixture to obtain  $\text{NdAlO}_3$ . The experimental study was carried out on the synthesis of the matrix material based on the results of the developed model. The authors have determined the optimal conditions for preparation of the components batch: the initial system density should not exceed 5,29 g/cm<sup>3</sup> which corresponds to pressure of 40 MPa; the maximum possible inclusion of  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  into Ni-Al system is not more than 40 wt. %. The performed XRD analysis showed the presence of a neodymium aluminate phase in all synthesized samples; the maximum proportion of  $\text{NdAlO}_3$  is achieved during the synthesis of a sample with 40 wt. % of  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  additive and pressure of 30 MPa. Thus, the use of a resource-efficient and simple technology of self-propagating high-temperature synthesis makes it possible to obtain a reliable matrix material for radioactive waste immobilization.

### Key words:

Self-propagating high-temperature synthesis, perovskite, nuclear waste, immobilization, actinides.

### REFERENCES

- Zhang J. *Nuclear fuel reprocessing and waste management*. Singapore, World Scientific Publishing Company, 2018. 279 p. Available at: <https://doi.org/10.1142/11017> (accessed 15 August 2021).
- Theodore M.K., Theodore L. *Introduction to environmental management*. Boca Raton, CRC Press, 2021. 556 p. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003171126> (accessed 15 August 2021).
- Colburn H.A., Peterson R.A. A history of Hanford tank waste, implications for waste treatment, and disposal. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2021, vol. 40, 12 p. Available at: <https://doi.org/10.1002/ep.13567> (accessed 15 August 2021).
- Solberg-Johansen B. *Life cycle assessment of the nuclear fuel cycle*. London, Academic Press, 1998. 349 p.
- Ma J., Fang Z., Yang X., Wang B., Luo F., Zhao X., Wang X., Yang Y. Investigating hollandite-perovskite composite ceramics as a potential waste form for immobilization of radioactive cesium and strontium. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, pp. 9644–9654. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05886-2> (accessed 15 August 2021).
- Zhou L., Lia F., Liu J., Sun S., Liang Y., Zhang G. High-entropy  $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ -type oxide ceramics: a potential immobilising matrix for high-level radioactive waste. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 415, 9 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125596> (accessed 15 August 2021).
- Barinova T.V., Podbolotov K.B., Borovinskaya I.P., Shchukin A.S. Self-propagating high-temperature synthesis of ceramic matrices for immobilization of actinide-containing wastes. *Radiochemistry*, 2014, vol. 56, pp. 554–559. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1066362214050178> (accessed 15 August 2021).
- Gaidar S.M., Zhigarev V.D., Volkov A.A., Karelina M.Yu. Production of powder refractory products of self-propagating high-temperature synthesis in continuous combustion mode. *Russian Metallurgy*, 2017, no. 7, pp. 37–41. In Rus.
- Mansurov Z.A., Mofa N.N., Sadykov B.S., Shabanova T.A. Activation of the technological combustion process of oxide systems by different modifying additives. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2013, vol. 2, no. 3, pp. 106–112.
- Fabrichnaya O., Seifert H.J. Assessment of thermodynamic functions in the  $\text{ZrO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  system. *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 2008, vol. 32, no. 1, pp. 142–151. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2007.07.002> (accessed 15 August 2021).
- Fabrichnaya O., Seifert H.J., Weiland R., Ludwig T., Aldinger F., Navrotsky A. Phase equilibria and thermodynamics in the  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-}$

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>-system. *Zeitschrift für Metallkunde*, 2001, vol. 92, pp. 1083–1097.
12. Li L., Van der Biest O., Wang P., Vleugels J., Chen W., Huang S. Estimation of the phase diagram for the ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CeO<sub>2</sub> system. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, vol. 21, pp. 2903–2910.
  13. Veith M., Mathur S., Lecerf N., Bartz K., Heintz M., Huch V. Synthesis of a NdAlO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic–ceramic composite by single-source precursor CVD. *Chemistry of Materials*, 2000, vol. 12, no. 2, pp. 271–274. Available at: <https://doi.org/10.1021/cm991149g> (accessed 15 August 2021).
  14. Shackerfold J.F., Doremus R.H. *Ceramic and glass materials: structure, properties, processing*. New York, Springer, 2008. 201 p.
  15. Uiks K.E. *Termodinamicheskie svoistva 65 elementov i ikh oksidov, galogenidov, karbidov i nitridov* [Thermodynamic properties of 65 elements and their oxides, halides, carbides and nitrides]. Moscow, Metalurgia Publ., 1965. 126 p.
  16. Wang Y., Liu Z.K., Chen L.Q. Thermodynamic properties of Al, Ni, NiAl and Ni<sub>3</sub>Al from first-principles calculations. *Acta Material*, 2004, vol. 52, pp. 2665–2671.
  17. Greenwood N., Parish R., Thornton P. Some reaction of metal borides. *Journal of the Chemical Society*, 1985, vol. 66, pp. 545–549.
  18. Kugai L.N., Nazarchuk E.N. Chemical stability of diborides of the transition metals from groups IV–V of the periodic system. *Soviet powder metallurgy and metal ceramics*, 1971, no. 3, pp. 212–215. In Rus.
  19. Modylevskaya K.D., Samsonov G.V. Stoykost boridov perekhodnykh metallov protiv deystviya kislot i shchelochey [Resistance of transition metal borides against acids and alkalis]. *Ukrainskiy Khimicheskiy Zhurnal*, 1985, vol. 25, pp. 55–59.
  20. Osintsev O.E. *Metallovedenie tugoplavkikh metallov i splavov na ikh osnove* [Metallurgy of refractory metals and alloys based on them]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2021. 156 p.
  21. Mojaki S.C., Mishra S.B., Mishra A.K. Synthesis, characterization and material properties of titanium carbide nanocomposite derived from biochar. *Materials Letters*, 2020, vol. 264, 5 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127317> (accessed 15 August 2021).
  22. Wu Z., Chen Z., Wang L., Fang L., Zhou T., Mei T., Zhang C., Li Q. Solid-state synthesis of zirconium nitride and hafnium nitride powders. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2021, vol. 129, pp. 200–203. Available at: <https://doi.org/10.2109/jcersj2.20177> (accessed 15 August 2021).
  23. Rogachev A.S., Mukasyan A.S. *Gorenie dlya sinteza materialov. Vvedenie v strukturnuyu makrokinetiku* [Combustion for the synthesis of materials. Introduction to structural macrokinetics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2013. 400 p.
  24. Levashov E.A., Rogachev A.S., Kurbatkina V.V., Maksimov Yu.M., Yuhvid V.I. *Perspektivnye materialy i tekhnologii samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza* [Advanced materials and technologies for self-propagating high-temperature synthesis]. Moscow, NITU MISiS, 2011. 377 p.

Received: 13 October 2021.

#### Information about the authors

**Oleg Yu. Dolmatov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Mikhail S. Kuznetsov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Andrey O. Semenov**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК (550.42:546.65):551.312(571.1/5)

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДАХ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЕР БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ И КУЛУНДИНСКОЙ РАВНИНЫ

Страховенко Вера Дмитриевна<sup>1</sup>,  
strahova@igm.nsc.ru

Овдина Екатерина Андреевна<sup>1</sup>,  
ovdina@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С., СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью наращивания сырьевой базы сапропелевого сырья в Сибирском регионе. В Барабинской низменности и Кулундинской равнине преобладают бессточные озера, среди которых господствующее положение занимают малые водоемы (97,5 %) с сапропелевыми залежами на дне. Это связано с наличием своеобразного гривного рельефа для данных территорий, сформированного суффозионно-дефляционными процессами. Учитывая разнообразие озер, актуальным является изучение факторов, определяющих геохимический состав образующихся сапропелей.

**Цель:** определить геохимические особенности миграции и фракционирования РЗЭ в водах и донных отложениях малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины и на базе изучения лантаноидов реконструировать основные источники поступления вещества в формирующиеся сапропелевые залежи.

**Объекты:** воды и органоминеральные залежи малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины. Распределения РЗЭ компонентах озерных систем юга Западной Сибири слабо изучены, особенно в водах.

**Методы.** Полевые методы – керн донных отложений, воды отобраны с катамарана по стандартным методикам при помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун», Россия (диаметр 82 мм, длина 120 см) и батометра на 1 литр. В полевых условиях определены все переменные физико-химические параметры вод и донных отложений. Весь объем воды фильтровали методом вакуумной фильтрации с использованием фильтров с диаметром пор 0,45 мкм. Аналитические методы – водные пробы проанализированы на макро- и микроэлементы в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН и ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск. Основные катионы и анионы определялись методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10Avp, SHIMADZU), а органический углерод – методом ИК-детектирования на анализаторе TOC-V (Shimadzu, Япония). Микроэлементы определены методом индуктивно связанной плазмы (ICP-MS Agilent 7500 и 7500с) (аналитик Е.В. Еловский) и методом атомной абсорбции ИГМ СО РАН (аналитик Л.Н. Букреева). Изучение морфологии, фазового состава образцов донных отложений различных классов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3 (Tescan, Чехия), снабженного энергетическим спектрометром «OXFORD XMAX 450+» (Oxford Instruments, Великобритания). Содержание РЗЭ определялись в 112 пробах донных отложений методом ИСП-МС.

**Результаты.** Применение уникального методического подхода, выраженного в проведении современных биогеохимических, минералогических, геохимических исследований отдельно взятого озера в тесной взаимосвязи со всей системой компактно расположенных озёр (озёрной системой) на детально подобранных озерных системах: Барабинская, Куйбышевская (Барабинская низменность) и Танатарская, Петуховская (Кулундинская равнина), дало представление о связи современного формирования состава донных осадков с биогеохимией озерных вод, с составом почв и почвообразующих пород водосборных площадей озера, химическим составом автохтонной биоты и с ландшафтными условиями. Использование современных аналитических методов позволило оценить уровни концентраций и закономерности распределения РЗЭ в водах и донных осадках озер из разных ландшафтных зон с различным геохимическим типом вод (от ультрапресных до рассолов) и классом сапропеля (кремнезёмистого, кальциевого, смешенного с разными генетическими типами).

### Ключевые слова:

Малые озера юга Западной Сибири, геохимия, минералогия, редкоземельные элементы, вода, донные отложения.

### Введение

Изучение минералогических особенностей и геохимического состава осадочного вещества малых озер Сибири позволяет глубже понять процессы современного континентального седиментогенеза. В формировании донных отложений озер и морей участвует вещество, поступающее из разных источников: происходит, с одной стороны, смешение автохтонных и аллохтонных источников (усреднение химического состава), с другой стороны – дифференциация элементов, обусловленная присутствием их в разных формах в поверхностных водах [1–10 и др.]. Для озер Сибири важным является аккумуляция

льдом рассеянного осадочного вещества в длительный период ледостава (более 6 месяцев в году) и ураганным поступлением этого материала в период снеготаяния. Это обусловлено специфическим гривнолощинным рельефом, имеющим широкое развитие на территории Барабинской низменности и Кулундинской равнины, сложенным лессовыми отложениями, генетически связанными с суффозионно-дефляционными процессами [11].

В современных исследованиях широкое развитие получило применение различных реконструкций на базе изучения лантаноидов при решении ряда принципиальных вопросов литологии и палеогеографии

[12–19 и др.]. Считается, что основным источником поступления РЗЭ в воды океанов, морей и озер является взвешенный и растворенный речной сток, подчиненное значение имеют эоловый перенос, гидротермальная деятельность, ледниковый сток [5, 19 и др.]. По подсчетам В.С. Савенко [20], доля терригенной взвеси в океанской воде для лантаноидов составляет 80 %. Состав лантаноидов речных вод соответствует составу лантаноидов в континентальных глинах или среднему составу сланцев. РЗЭ в воде могут входить в состав твердой терригенной фракции взвеси; сорбироваться на поверхности взвеси, образуя коллоидные соединения; находиться в растворенной форме (ионной и комплексной) и их соотношения может сильно варьировать в разных водоёмах [8]. Цель работы – определить геохимические особенности миграции и фракционирования РЗЭ в водах и донных отложениях малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины и на базе изучения лантаноидов реконструировать основные источники поступления вещества в формирующиеся сапропелевые залежи.

#### Объекты и методы исследования

Объекты исследования – воды и органоминеральные залежи малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины. Котловины исследуемых озер локализованы в основном в осадочных континентальных озерно-аллювиальных отложениях неогена и четвертичного периодов, которые представлены лессовидными отложениями от тяжелосуглинистых и глинистых на севере до средне- и легкосуглинистых и супесчаных на юге, оказывающими непосредственное влияние на формирование рельефа, почв, растительного покрова [21]. В Барабинской низменности и Кулундинской равнине резко преобладают бессточные озера, среди которых господствующее положение занимают малые водоемы (97,5 %) размером до 2,5 км<sup>2</sup>. Это связано с наличием своеобразного гривного рельефа для данных территорий, генетически связанного с суффузионно-дефляционными процессами. Из-за перетока влаги с водоразделов глив в межгивные долины (чередование параллельно простирающихся с ЮЗ на СВ удлиненных холмов (глив) и понижений) в депрессиях рельефа скапливается вода – образуются озера [11]. Важно отметить, что лессовидные суглинки, которые распространены в Барабинской низменности и Кулундинской равнине, покрывающие слоем от 0,2 до 1,5 м и более гривообразные и увалообразные возвышения, имеют эоловый генезис. Это определяет значительную гомогенизацию гранулометрического и химического составов почвообразующих пород и почв, а следовательно, и взвешенного материала, поступающего в озера со снеготальными водами. Резкое преобладание кислого и среднего плагиоклаза в составе суглинков (около 65 % от общей массы минералов) определяет наличие большого количества содового типа вод на всей территории. Климат района резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха колеблется от –1 до 0 °С со среднемесячными максимумами в июле плюс 19–20° и минимумами в

январе минус 21–22°. Среднегодовое количество осадков составляет 350–375 мм, период ледостава на озерах длится около 6–7 месяцев.

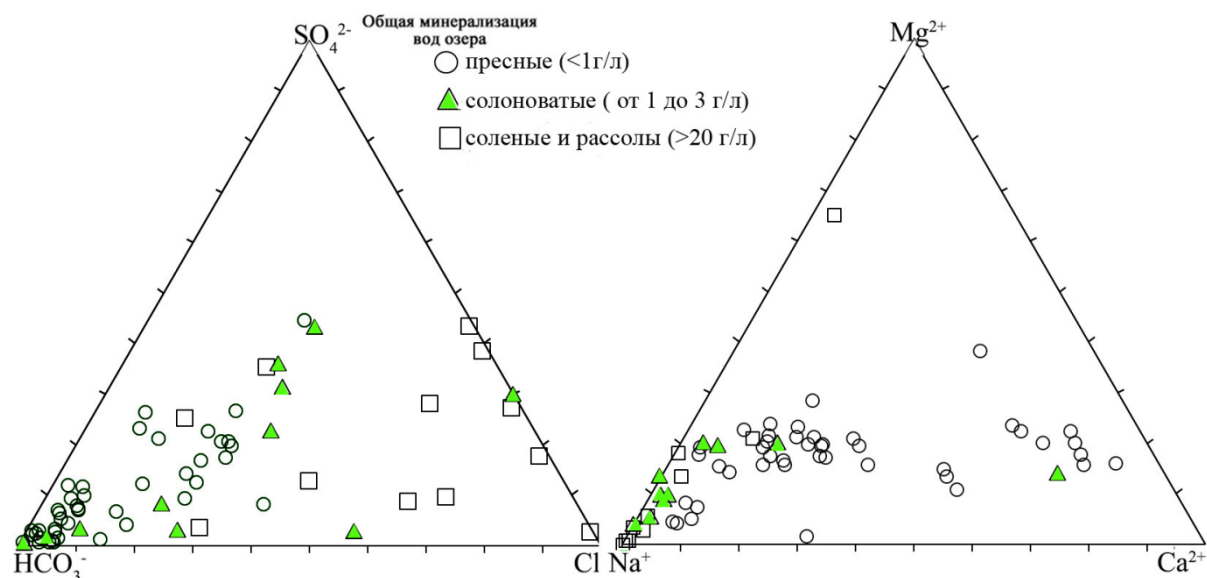
Методы анализа подробно описаны нами при изучении минерального и химического состава сапропелей малых озер Сибири [22, 23]. Во время полевых работ произведен отбор керн донных отложений и воды с катамарана по стандартным методикам при помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун», Россия (диаметр 82 мм, длина 120 см). В полевых условиях определены все переменные физико-химические параметры вод и донных отложений. Для отбора водных проб использовали батометр на 1 литр. Весь объем воды фильтровали методом вакуумной фильтрации с использованием специально подготовленных заранее взвешенных мембранных фильтров с диаметром пор 0,45 мкм. Фильтры со взвесью помещались в чашки Петри. Фильтраты воды консервировались концентрированной азотной кислотой из расчета 1 мл кислоты на 100 мл пробы для последующего определения в них металлов и микроэлементов. При аналитическом определении металлов принято считать растворенными формами те, что проходят через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм, взвешенными – те, что остаются на фильтре. Водные пробы проанализированы на макро- и микроэлементы в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН и ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск (47 проб). Основные катионы и анионы определялись методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10AVp, SHIMADZU), а органический углерод – методом ИК-детектирования на анализаторе TOC-V (Shimadzu, Япония). Микроэлементы определены методом индуктивно связанной плазмы (ICP-MS Agilent 7500 и 7500с) (аналитик Е.В. Еловский) и методом атомной абсорбции ИГМ СО РАН (аналитик Л.Н. Букреева). Точность определения микроэлементов составляла не менее 1 % и РЗЭ не менее 5 % RSD. Изучение морфологии и фазового состава образцов донных отложений различных классов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3 (Tescan, Чехия), снабженного энергетическим спектрометром «OXFORD XMAX 450+» (Oxford Instruments, Великобритания). Содержание РЗЭ определялись в 112 пробах донных отложений методом ИСП-МС. Точность и воспроизводимость анализов определялись с использованием стандартных образцов. Параллельные образцы вод и донных отложений использовались для оценки воспроизводимости: каждый 10-й образец дублировался и анализировался в строгом соответствии с методикой. Анализы выполнены научными сотрудниками аналитического центра ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

#### Результаты и их обсуждение

Согласно литературным данным на территории лесостепи и степи Барабинской низменности, Кулундинской равнины происходит интенсивная аккумуляция легкорастворимых солей, и в связи с этим состав

озёрных вод отличается широким спектром солёности: от пресных до рассолов [24]. Важно отметить, что согласно нашим предыдущим исследованиям, основные характеристики вод (степень минерализации вод, значение pH, содержание растворенного в воде кислорода, концентрации органического вещества (по БПК<sub>5</sub>), гидрокарбонатов, сульфатов, нитратов и фосфатов) изученных озёр, расположенных компактно на небольшой территории, могут значительно отличаться

(более чем 2–5 раз). Так как глубина озёр не превышает 5 м, воды хорошо перемешиваются, не испытывают недостатка света и биогенных элементов. По содержанию главных ионов воды озёр в основном гидрокарбонатно Na и гидрокарбонатно Na-Mg-Ca, щелочные, со значениями pH от 7,6 (оз. Малиновое) до 10 (оз. Жилое-К) (рис. 1). Значения общей минерализации озёрных вод варьируют от пресных (от 0,11 до 0,98 г/л) до рассолов (от 24 до 89 г/л).



**Рис. 1.** Диаграммы катионного и анионного состава вод изученных озёр с учетом величины их общей минерализации вод: круг – пресные с минерализацией вод до 1 г/л; треугольник – солоноватые, минерализация вод от 1 до 3 г/л; квадрат – рассолы, минерализация вод более 20 г/л

**Fig. 1.** Diagrams of the cationic and anionic composition of the waters of the studied lakes, taking into account the value of their total water salinity: circle – fresh water with salinity up to 1 g/l; triangle – brackish, water salinity is from 1 to 3 g/l; square – brines, water salinity is more than 20 g/l

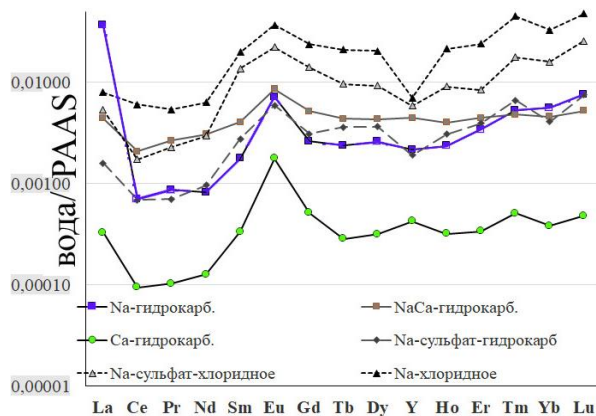
К солоноватым водам можно отнести воды озёр Песчаное, Цыбово, Чистое, Жилое, Демкино, Рублево, так как их минерализация меняется в пределах от 1 до 3 г/л. Практически во всех озерных водах прослеживается корреляция значений окислительно-восстановительного потенциала и коэффициента кислотности/щелочности. Это указывает на сходные гидрологогеологические условия для них. Насыщение вод растворенным кислородом соответствует экологическому оптимуму (от 5,7 до 13,0 мг/дм<sup>3</sup>). Количество органического вещества в воде варьирует (БПК<sub>5</sub>=1,9–7,44 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>), поэтому данные озера можно отнести к эвтрофному и гипертрофному типам. Исходя из данных условий в озерах формируются органо-минеральные донные отложения макрофитного, планктонного и макрофитно-планктонного генезиса (сапропели). Зарастания макрофитами озёр данной территории, так же как и уровень продуктивности водных фитоценозов, значительно варьируют от озера к озеру. Тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) и рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.) доминируют среди макрофитов полупогруженной растительности на фоне преобладания фитопланктона. В озерах с преобладанием макрофитов основные продуценты органического вещества – те-

лорез (*Stratiotes aloides* L.), рдесты (*Potamogeton berchitoldii* Fieb., *P. gramineus* L., *P. perfoliatus* L.), уруть (*Miriophyllum sibiricum* Kom.), роголистник (*Ceratophyllum demersum* L.), ряска (*Lemna trisulca* L.); полупогруженные – рогоз узколистный, тростник южный, осоки (*Carex acuta* L., *C. pseudocyperus* L.) [25]. Массовое развитие макрофитов в литорали определяет бюджет органического углерода и регулирует содержание соединений азота и фосфора в воде и донных отложениях.

Согласно полученным аналитическим данным в сравнении с литературными источниками, в водах изученных озёр концентрации макроэлементов в основном ниже, чем их распространение в гидросфере, а для микроэлементов находятся на уровне значений, приведенных для северных озёр Евразии. Озерные воды обогащены группой элементов, которые обычно находятся в виде взвеси и/или взвесью сорбируются (Al, Fe, Mn, Cu, Zn). В озерных водах наблюдаются более высокие значения C и P, чем в гидросфере [26].

В водах озёр содержание  $\sum REE$  варьирует в широком диапазоне – от 0,05 до 155,3 мкг/л, при этом воды также различаются по величинам отрицательной Ce/Ce\* ( $Ce/Ce^* = 2(Ce_n)/(La_n + Pr_n)$ ) и положительной Eu/Eu\* ( $Eu/Eu^* = 2(Eu_n)/(Sm_n + Gd_n)$ ) аномалии. Авто-

рами использована нормализация, общепринятая в морской геохимии, по среднему образцу постаршейских австралийских сланцев (PAAS) [27]. Спектры распределения РЗЭ в водах озер (сгруппированных по основному 6 ионам вод), нормированные по PAAS, приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Нормированные на PAAS спектры распределения РЗЭ в современных водах малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины в зависимости от типа вод: Na-гидрокарбонатные (от ультрапресных до рассолов), NaCa-гидрокарбонатные (от ультрапресных до солоноватых), Na-сульфатно-гидрокарбонатные (от пресных до соленых), Na-сульфатно-хлоридные (от соленых до рассолов), Na-хлоридные (от соленых до рассолов), Ca-гидрокарбонатные (пресные)

**Fig. 2.** PAAS-normalized REE distribution spectra in the modern waters of the small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain, depending on the type of water: Na-bicarbonate (from ultra-fresh to brine), NaCa-bicarbonate (from ultra-fresh to brackish), Na-sulfate-bicarbonate (from fresh to salty), Na-sulfate-chloride (from salty to brine), Na-chloride (from salt to brine), Ca-bicarbonate (fresh)

Воды отдельно взятой системы озер (например, Барабинской или Танатарской) различаются не только по общему содержанию REE ( $\Sigma\text{REE}=0,09\text{--}1,65$  мкг/л и  $0,03\text{--}2,66$  мкг/л соответственно), но и величинами аномалий церия и европия.

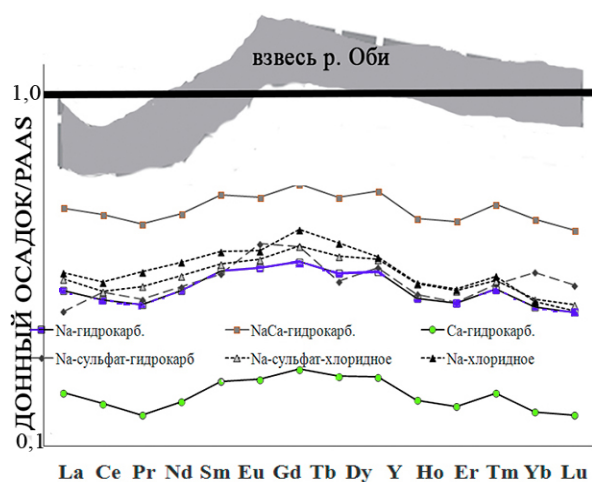
Сопоставление особенностей распределения РЗЭ в различных типах вод из озер разных ландшафтных зон показывает, что в целом спектры распределения различных типов вод имеют сходную конфигурацию, характеризуются направленностью кривых в сторону слабого обогащения по тяжелым и средним лантаноидам, ярко выраженной положительной аномалией по европию ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* - 1,1\text{--}19,3$ ) и отрицательной аномалией церия ( $\text{Ce}/\text{Ce}^* - 0,03\text{--}0,98$ ). Обычно поверхностные и подземные воды наследуют распределение редкоземельных элементов в породах, через которые они протекают [12, 14, 16, 18 и др.]. Наличие высокой положительной Eu аномалии указывает на то, что существенный вклад в формирование состава вод внесло взаимодействие метеорных вод с осадочными породами – покровными лессовидными суглинками, которые на 60–80 % состоят из полевого шпата (альбит,

олигоклаз, андезин). В сульфат-хлоридных и хлоридных Na водах выявлена отрицательная Y аномалия. Согласно литературным данным, накопление РЗЭ в водах часто контролируется процессами эвапоритизации. В изученных водах озер прямой корреляции между уровнем минерализации вод и величиной  $\Sigma\text{REE}$  не выявлено. Но если проанализировать особенности распределения РЗЭ в различных типах вод (т. е. средние значения РЗЭ в водах, сгруппированных по основным макроэлементам), то прослеживается увеличение количества РЗЭ при нарастании степени метоморфизации вод. Особенно низкими концентрациями РЗЭ, при аналогичном спектре распределения лантаноидов, отличаются  $\text{HCO}_3\text{--Ca}$  воды, это, вероятно, указывает на то, что основным источником их поступления в озеро являются снеготалые воды.

Для определения фациальных условий осадконакопления и климата возможно применение некоторых индикаторных отношений РЗЭ или их групп:  $\text{La}_n/\text{Yb}_n$ ,  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ , где  $\Sigma\text{Ce}:(\text{La}\text{--}\text{Eu})$ ,  $\Sigma\text{Y}:(\text{Gd}\text{--}\text{Lu}, \text{Y})$  и др. [16, 18, 28 и др.]. Согласно научным статьям, коэффициент  $\text{La}_n/\text{Yb}_n$  отражает фациальные условия седиментации и может показывать степень обогащения легкими редкими землями относительно тяжелых. Но при изучении распределения РЗЭ в водах исследуемых озер коэффициент  $\text{La}_n/\text{Yb}_n$  оказался неинформативен. Известна (по литературным данным) зависимость значений La от щелочности вод (в высоко щелочных водах  $\text{pH}>9,5$  значения La максимальны), а как показано выше, при характеристике вод озер pH меняется именно в этом диапазоне для большинства озер. Для озерных обстановок, близко расположенных к области сноса,  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  соответствует типу литогенеза, наиболее проявленному в пределах площадей водосбора водоема. При гумидном литогенезе более интенсивно разрушаются полевые шпаты, акцессорные минералы, содержащие лантаноиды цериевой группы, что приводит к увеличению отношения; в аридном климате отношение уменьшается [12]. В.А. Шатров, в отличие от ранее предложенных числовых значений, характеризующих типы литогенеза, предложил несколько иные значения коэффициента:  $<2,5$  – аридный;  $2,5\text{--}4$  – семигумидный-семиаридный;  $>4$  – гумидный [16]. Посчитанные значения коэффициента  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  для вод малых озер Барабинской (варьирует от 3,9 до 13,5) и Куйбышевской систем (4,5–13,2) (гумидный климат) и Танатарской (1,1–2,4) и Петуховской (1,0–1,5) (аридный климат) систем хорошо согласуются с предложенными величинами. Сильно варьируют значения  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  для вод озер, расположенных в ленточных борах, – от 0,9 до 18,8 – независимо от места расположения бора. Результаты исследований показали, что значения коэффициента  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  хорошо коррелируют с типом литогенеза, характерного для водосборной территории озера, за некоторым исключением (озера ленточных боров).

Вещественный состав сапропелей может иметь серьезные различия в зависимости от его происхождения, органическая часть отличается в первую очередь соотношением биологического вклада различных организмов в формирование отложений. Авторами де-

тально изучена геохимия сапропелевых отложений малых озер юга Западной Сибири [22, 23]. Первичные аналитические данные для научной интерпретации сгруппированы по различным факторам: климатическим зонам площадей водосбора озер, зольности донных отложений, минеральному составу неорганической части и групповому составу органической и т. д. Установлено, что органическая часть сапропелей отличается соотношением вклада биологических видов организмов и имеет значительные различия в групповом составе [22, 23]. Обобщение информации выявило, что, согласно данным рентгеноструктурного анализа и СЭМ, минеральная составляющая представлена довольно постоянным набором основных минералов: кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, мусковит и/или карбонаты кальцит-доломитового ряда, арагонит. В качестве второстепенных минералов присутствуют: пирит, гидрослюды, хлориты и акцессорные минералы: ильменит, гематит, циркон, монацит, магнетит, апатит, рутил, титанит и др. При этом если карбонаты Са-Mg являются основными минералами, то терригенная фракция имеет тот же набор минералов.



**Рис. 3.** Нормированные на РААС спектры распределения РЗЭ в донных осадках малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины, сгруппированные по типу вод, из которых они формируются. На диаграмму добавлена область распределения РЗЭ в речной взвеси р. Оби (заимствовано из [29]), закрашена серым цветом

**Fig. 3.** PAAS-normalized REE distribution spectra in the bottom sediments of the small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain, grouped by the type of water from which they are formed. The area of REE distribution in the river suspension of the Ob River has been added to the diagram (borrowed from [29]), painted in gray

Анализ распределения РЗЭ в пробах сапропелевых отложений, формирующихся в данных озерах, из всего возможного многообразия их разделения на отдельные группировки позволил выявить общие закономерности. Полученные аналитические данные показали, что в сапропелевых отложениях озер содержание  $\sum REE$  варьирует в широком диапазоне – от 8 до 162 мкг/кг, при этом донные отложения сходны по отсутствию в них как аномалии  $Ce/Ce^*$  (0,89–1,1), так

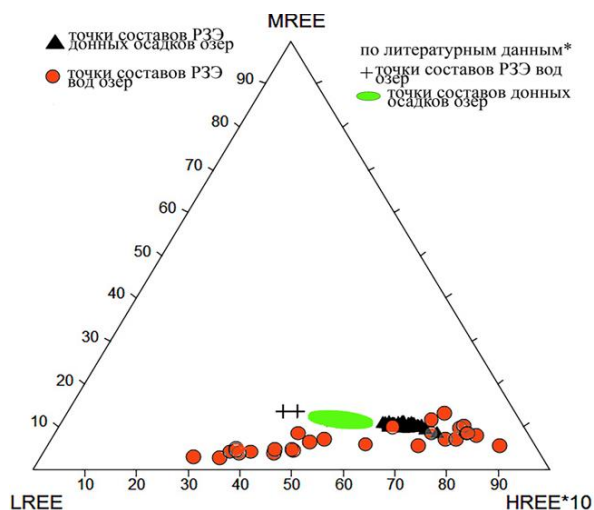
и аномалии  $Eu/Eu^*$  (0,88–1,21). Для донных осадков авторами также использована нормализация по среднему образцу постархейских австралийских сланцев (PAAS) [27]. Распределение редкоземельных элементов в сапропелевых залежах характеризуется пологой дугообразной формой с промежуточным максимумом в области средних РЗЭ (рис. 3). Значение  $\sum Ce/\sum Y$  для сапропелевых отложений исследуемых озер практически постоянно (изменяется от 3,66 до 4,88) и не зависит от места расположения озера. Такое распределение характерно для донных отложений, в которых РЗЭ присутствуют в виде сорбированной взвеси. Для всех изученных органоминеральных отложений малых озер донные отложения отдельных озер отличаются только абсолютными значениями  $\sum РЗЭ$ , которые зависят от минерального состава терригенной фракции, генезиса и количества органического вещества и карбонатов в осадке. По уровню концентрации РЗЭ терригенные фракции сапропелевых залежей близки к их уровню в горных породах водосборных территорий и верхней континентальной коре. Значительное уменьшение абсолютных содержаний РЗЭ происходит при высоких содержаниях органического вещества (органоминеральные сапропели всех классов) и карбонатов (все типы сапропеля Са класса).

Для возможности сравнения одновременно большого количества анализов РЗЭ в водах и донных осадках всех исследуемых озер построена диаграмма LREE-MREE-(HREE×10), где в состав групп включены: легкие (LREE) La-Pr, средние (MREE) Nd-Dy, тяжелые (HREE) лантаноиды Ho-Lu, +Y. Это позволяет одновременно рассмотреть полный состав лантаноидов, выделить области, отвечающие формированиям донных осадков в разных условиях [28]. Источники поступления РЗЭ в донные отложения озер многофакторны, следовательно, сгущение точек на диаграмме будет соответствовать наиболее типичным геологическими процессам, определяющим спектры лантаноидов в них (рис. 4).

Согласно анализу диаграммы распределения РЗЭ в водах и донных отложениях изученных озер отмечается идентичность их поведения для донных осадков, приведенных по литературным данным, и значительно более широкий диапазон распространения для вод. В водах наблюдается относительно небольшое обогащение тяжелыми РЗЭ для вод озер, расположенных в сухостепной зоне, за исключением озер из ленточных боров. Диаграмма LREE-MREE-(HREE×10) для лантаноидов донных осадков позволила выделить единое поле обстановки осадконакопления.

Согласно полученным аналитическим данным, средние содержания РЗЭ сапропелевых отложений разных классов, сформированные из вод разного типа во всех изученных ландшафтных обстановках, различаются в тех же пределах, что и между различными классами сапропелей, образованных из одного типа вод (рис. 2–4). Исключение составляют сапропелевые отложения, образованные из Са-гидрокарбонатных вод. Но в данном случае это, скорее всего, связано с тем, что в этих водах в выборке изученных донных отложений присутствуют только кальциевый и смешанный

класс сапропеля. То есть в этих отложениях высокий процент в составе сапропелевой залежи карбонатов, которые являются разбавителями для величины РЗЭ.



**Рис. 4.** Положение на диаграмме LREE-MREE-(HREE×10) фигуративных точек составов РЗЭ в воде и донных отложениях озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины: треугольник – современные донные осадки изученных озер; круг – в воде изученных озер; + – точки вод озер по литературным данным [28]; овальная серая область – донные осадки озер по литературным данным [28]

**Fig. 4.** Position on the LREE-MREE-(HREE×10) diagram of the figurative points of REE compositions in the water and bottom sediments of the lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain: triangle – modern bottom sediments of the studied lakes; circle – in the water of the studied lakes; + – points of the lake waters according to the literature data [28]; oval gray area – bottom sediments of the lakes according to the literature data [28]

Спектры РЗЭ сапропелевых отложений озер близки по особенностям распределения РЗЭ для речной взвеси р. Оби (заимствовано из [29]) и для сравнения приведено на рис. 3). Характер распределения РЗЭ сапропелевых отложений озер соответствует тренду для осадочных образований дренирующихся водосборов (суглинков) и значительно не различается для изученных ландшафтов территорий Барабинской низменности и Кулундинской равнины, и слабо соответствует спектрам распределения РЗЭ их вод.

#### Заключение

Применение уникального методического подхода, выраженного в проведении современных биогеохимических, минералогических, геохимических исследований отдельно взятого озера в тесной взаимосвязи

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страхов Н.М. Избранные труды. Осадкообразование в современных водоемах. – М.: Наука, 1993. – 396 с.
2. Савенко А. В., Савенко В. С., Покровский О. С. Новые данные по содержанию растворенных микроэлементов в водах рек Российской Арктики // Доклады российской академии наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 491. – № 2. – С. 82–88.

со всей системой компактно расположенных озёр (озёрной системой) на детально подобранных озерных системах: Барабинская, Куйбышевская (Барабинская низменность) и Танатарская, Петуховская (Кулундинская равнина), дало представление о связи современного формирования состава донных осадков с биогеохимией озерных вод, с составом почв и почвообразующих пород водосборных площадей озера, химическим составом автохтонной биоты и с ландшафтными условиями. Использование современных аналитических методов позволило оценить уровни концентраций и закономерности распределения редкоземельных элементов в водах и донных осадках озер из разных ландшафтных зон с различным геохимическим типом вод (от ультрапресных до рассолов) и классом сапропеля (кремниевое, кальциевое, смешенное с разными генетическими типами).

Установлено, что содержание  $\sum REE$  варьирует в широком диапазоне – от 0,05 до 155,3 мкг/л – в различных типах вод озер разных ландшафтных зон. В целом спектры распределения различных типов вод имеют сходную конфигурацию, характеризуются направленностью кривых в сторону слабого обогащения по тяжелым и средним лантаноидам, ярко выраженной положительной аномалией по европию и отрицательной аномалией церия. Выявлено, что значения коэффициента  $\sum Ce / \sum Y$  в современных водах озер в основном соответствуют типу литогенеза, характерному для их водосборных территорий. Наличие выраженной положительной аномалии  $Eu/Eu^*$  позволяет предполагать, что распределение РЗЭ в водах озер определяется процессами гидролиза алюмосиликатов, в исходном составе которых основная роль принадлежала полевым шпатам.

Выявлено, что в сапропелевых отложениях озер содержание  $\sum REE$  варьирует в широком диапазоне, при отсутствии в них аномалий церия и европия. Спектр РЗЭ в сапропелевых залежах характеризуется пологой дугообразной формой с промежуточным максимумом в области средних РЗЭ, при этом увеличение количества карбонатов или органического вещества определяет уменьшение абсолютных содержаний РЗЭ в осадках. Следовательно, основным поставщиком РЗЭ в сапропелевые отложения малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины являются частицы взвеси, приносимые в озера, а различия в концентрациях обусловлено количеством органического вещества и карбонатов, образующихся в озерах.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

3. Динамика основных компонентов потоков рассеянного осадочного вещества в Белом море/ Академик РАН А.П. Лисицын, А.Н. Новигатский, В. П. Шевченко, А.А. Кловиткин, М.Д. Кравчишина, Н.В. Политова // Доклады российской академии наук. Науки о Земле. – 2017. – Т. 472. – № 6. – С. 712–715.
4. The recent deposition of laminated sediments in highly eutrophic Lake Kierskie, western Poland: 1 year pilot study of limnological



- monitoring and sediment traps / K. Apolinarska, K. Pleskot, A. Pelechata, M. Migdalek, M. Siepak, M. Pelechaty // J. Paleolimnology. – 2020. – V. 63. – P. 283–304.
5. Budko D.F., Demina L.L., Lisitzin A.P. The heavy metal partitioning in the particle flux of the subarctic White Sea (Northwestern Russia) // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2021. – V. 249. – 107063. DOI: 10.1016/j.ecss. 2020.107063
  6. The soda lakes of Nhecolândia: a conservation opportunity for the Pantanal wetlands / R.L. Guerreiro, Bergier Iv., M. McGlue, L.V. Warren, U. Gomes Pinto de Abreu, J. Abrahão, M.L. Assine // Perspectives in Ecology and Conservation. – 2019. – V. 17. – P. 1–9.
  7. Zarczynski M., Wacnik A., Tylmann W. Tracing lake mixing and oxygenation regime using the Fe/Mn ratio in varved sediments: 2000 year-long record of human-induced changes from Lake Zabinskie (NE Poland) // Science Total Environment. – 2019. – V. 657. – P. 585–596.
  8. Novigatsky A.N., Klyuvitkin A.A., Lisitsyn A.P. Vertical fluxes of dispersed sedimentary matter, absolute masses of the bottom sediments, and rates of modern sedimentation // The Handbook of Environmental Chemistry. – 2018. – V. 82. – P. 49–66.
  9. Postglacial sedimentation in the White Sea (northwestern Russia) reconstructed by integrated microfossil and geochemical data / D.F. Budko, L.L. Demina, E.A. Novichkova, Y.I. Polyakova, M.D. Kravchishina, V.N. Melenevsky // Quaternary research. – 2020. – V. 93. – № 1. – P. 110–123
  10. Mineralogical and geochemical composition of Late Holocene bottom sediments of Lake Onego / V.D. Strakhovenko, D. Subetto, E.A. Ovdina, I.V. Danilenko, N. Belkina, N. Efrementko, A. Maslov // Journal of Great Lakes Research. – 2020. – V. 46. – № 3. – P. 443–455.
  11. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 277 с.
  12. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 268 с.
  13. Piper D., Bau M. Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions // American Journal of Analytical Chemistry. – 2013. – V. 4. – № 10. – P. 69–83.
  14. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited / B. Germain, S. Toucanne, Ch. Skonieczny, L. Andre, S. Bermell, S. Cheron, B. Dennielou, J. Etoubleau, N. Freslon, T. Gauchery, Y. Germain, S. Jorry, G. Ménot, L. Monin, E. Ponzevera, M.L. Rouget, K. Tachikawa, J.-A. Barrat // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2015. – V. 170. – P. 17–38.
  15. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Поведение редкоземельных элементов при смешивании различных типов воды (Кунашир, Курильские острова) // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 4. – № 2. – С. 171–186.
  16. Шатров В.А. Лантаноиды как индикаторы обстановок образования меловых фосфоритов (на примере Восточно-Европейской платформы) // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 414. – № 1. – С. 90–92.
  17. Маслов А.В., Шевченко В.П. Систематика редких земель и Th во взвеси и донных осадках устьевых зон разных категорий/классов рек мира и ряда крупных рек Российской Арктики // Геохимия. – 2019. – Т. 64. – № 1. – P. 59–78.
  18. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Недра, 2006. – 360 с.
  19. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Low land across a 1700 km latitudinal gradient / V.P. Shevchenko, O.S. Pokrovsky, S.N. Vorobyev, I.V. Krickov, R.M. Manasypov, N.V. Politova, S.G. Kopysov, O.M. Dara, Yv. Auda, L.S. Shirokova, L.G. Kolesnichenko, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // Hydrology and Earth System Sciences. – 2017. – V. 21. – P. 5725–5746.
  20. Савенко В.С. О соотношении биогенной и терригенной взвеси в океане // Доклады Акад. наук. – 1999. – Т. 364. – № 2. – С. 251–254.
  21. Обь-Ситительная записка к карте четвертичных отложений. Масштаб 1:200000. Серия Кулундинско-Барабинская. Лист: N-44-I. – Новосибирск: Западно-Сибирское книжное изд-во, 1967. – 88 с.
  22. Савченко Н.В. Гидрохимическое состояние озер низменных равнин Северной Евразии (на примере Западной Сибири). – Новосибирск: Деп. в ВИНТИ, 2004. – № 1266. – 364 с.
  23. Взаимосвязь химического состава органического вещества озерных систем и генезиса сапропелей / О.П. Таран, В.В. Болтенков, Н.И. Ермолаева, Е.Ю. Зарубина, И.В. Делий, Р.Е. Романов, В.Д. Страховенко // Геохимия. – 2018. – № 3. – С. 61–70.
  24. Генезис органоминеральных отложений озер центральной части Барабинской низменности (юг Западной Сибири) / В.Д. Страховенко, Е.А. Овдина, Г.И. Малов, Н.И. Ермолаева, Е.Ю., Зарубина, О.П. Таран, В.В. Болтенков // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 9. – С. 1231–1243.
  25. Зарубина Е.Ю., Соколова М.И. Роль зональных факторов в формировании продуктивности малых озер юга Обь-Иртышского междуречья // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Матер. II Международной конференции. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2019. – Ч. 1. – С. 80–84.
  26. Особенности химического состава озерных вод и формирующихся из них разнотипных сапропелей на юге Западной Сибири / В.Д. Страховенко, Е.А. Овдина, Н.И. Ермолаева, Е.Ю. Зарубина, А.В. Салтыков // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 426–431.
  27. Тейлор С.Р., Мак-Леннон С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. – М.: Мир, 1988. – 384 с.
  28. Шатров В.А., Войцеховский Г.В. К проблеме поведения лантаноидов в водах и осадочных образованиях современного мирового океана // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2010. – № 3. – С. 73–83.
  29. Шевченко В.П., Маслов А.И., Штайн Р. Распределение ряда редких и рассеянных элементов в осадочном материале, переносимом дрейфующими льдами в районе плато Ермак, Северный Ледовитый океан // Океанология. – 2017. – Т. 57. – № 6. – С. 949–959.

Поступила 13.10.2021 г.

#### Информация об авторах

**Страховенко В.Д.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий сотрудник лаборатории геохимии редких и благородных элементов Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С.

**Овдина Е.А.**, научный сотрудник лаборатории геохимии редких и благородных элементов Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С.

UDC (550.42:546.65):551.312(571.1/5)

## FEATURES OF DISTRIBUTION OF RARE EARTH ELEMENTS IN THE WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS OF SMALL LAKES OF THE BARABINSK LOWLAND AND THE KULUNDINSKY PLAIN

Vera D. Strakhovenko<sup>1</sup>,  
strahova@igm.nsc.ru

Ekaterina A. Ovdina<sup>1</sup>,  
ovdina@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS,  
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to increase the raw material base of sapropel raw materials in the Siberian region. In the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain, drainless lakes strongly predominate, among which the dominant position is occupied by small reservoirs (97,5 %) with sapropel deposits at the bottom. This is due to the presence of a peculiar mountain relief for these territories, which is genetically associated with suffusion-deflation processes. Taken into account the diversity of lakes, it is important to study the factors that determine the geochemical composition of the resulting sapropels.

**The main aim** of the research is to determine the geochemical features of REE migration and fractionation in the waters and bottom sediments of the small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain and, based on the study of lanthanides, to reconstruct the main sources of the substance entering the emerging sapropel deposits.

**Objects:** waters and organomineral deposits of small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain. REE distribution in the components of lake systems in the south of Western Siberia is poorly studied, especially in the waters.

**Methods.** Field methods – bottom sediment core, waters were sampled from the catamaran according to standard methods using a cylindrical sampler with a vacuum gate designed by NPO Typhun, Russia (diameter 82 mm, length 120 cm) and a 1-liter bathometer. All variable physical and chemical parameters of water and bottom sediments were determined in the field. The entire volume of water was filtered by vacuum filtration using filters with a pore diameter of 0,45 microns. Analytical methods – water samples were analyzed for macro- and microelements in the Primorsky Center for Local Elemental and Isotope Analysis of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS, Novosibirsk. The main cations and anions were determined by liquid ion chromatography (HPLC-10AVp, SHIMADZU), and organic carbon was determined by IR detection on a TOC – V analyzer (Shimadzu, Japan). Trace elements were determined by the inductively coupled plasma method (ICP-MS Agilent 7500 and 7500c) (analyst E.V. Elovsky) and by the atomic absorption method of IGM SB RAS (analyst L.N. Bukreeva). The morphology and phase composition of sediment samples of various classes were studied using a scanning electron microscope (SEM) TESCAN MIRA 3 (Tescan, Czech Republic) equipped with an energy spectrometer «OXFORD XMAX 450+» (Oxford Instruments, UK). The REE content was determined in 112 samples of bottom sediments by the ICP-MS method.

**Results.** The application of a unique methodological approach, expressed in modern biogeochemical, mineralogical, geochemical studies of a single lake in close relationship with the entire system of compactly located lakes (lake system) on the carefully selected lake systems: Barabinskaya, Kuibyshevskaya (Baraba) and Tanatarskaya, Petukhovskaya (Kulunda), gave an idea of the relationship of the modern formation of the composition of bottom sediments with the biogeochemistry of lake waters, with the composition of soils and soil-forming rocks of the catchment areas of the lake, the chemical composition of the autochthonous biota and the landscape conditions. The use of modern analytical methods allowed us to estimate the levels of concentrations and patterns of distribution of rare earth elements in the waters and bottom sediments of lakes from different landscape zones with different geochemical types of water (from ultra-fresh to brine) and sapropel class (silica, calcium, mixed with different genetic types).

### Key words:

Small lakes of the south of Western Siberia, geochemistry, mineralogy, rare earth elements, water, bottom sediments.

The research was carried out within the framework of the State assignment IGM SB RAS and financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

### REFERENCES

1. Strakhov N.M. *Izbrannyye Trudy. Osadkoobrazovanie v sovremennykh vodoemakh*. [Selected Works. Sedimentation in modern reservoirs]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 396 p.
2. Savenko A.V., Savenko V.S., Pokrovsky O.S. New data on the concentrations of dissolved trace elements in waters of Russian Arctic rivers. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 491, P. 2, pp. 257–263.
3. Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Politova N.V. Dynamics of the main components of fluxes of sedimentary matter in the White sea. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 472, no. 2, pp. 331–571.
4. Apolinarska K., Pleskot K., Pelechata A., Migdalek M., Siepak M., Pelechaty M. The recent deposition of laminated sediments in highly eutrophic Lake Kierskie, western Poland: 1 year pilot study of limnological monitoring and sediment traps. *J. Paleolimnology*, 2020, vol. 63, pp. 283–304.
5. Budko D.F., Demina L.L., Lisitzin A.P. The heavy metal partitioning in the particle flux of the subarctic White Sea (Northwestern Russia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, vol. 249, 107063.
6. Guerreiro R.L., Bergier Iv., McGlue M., Warren L.V., Gomes Pinto de Abreu U., Abrahão J., Assine M.L. The soda lakes of Nhecolândia: a conservation opportunity for the Pantanal wetlands. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2019, vol. 17, pp. 1–9.
7. Zarczynski M., Wacnik A., Tylmann W. Tracing lake mixing and oxygenation regime using the Fe/Mn ratio in varved sediments:

- 2000 year-long record of human-induced changes from Lake Zabinskie (NE Poland). *Science Total Environment*, 2019, vol. 657, pp. 585–596.
8. Novigatsky A.N., Klyuvitkin A.A., Lisitsyn A.P. Vertical fluxes of dispersed sedimentary matter, absolute masses of the bottom sediments, and rates of modern sedimentation. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 2018, vol. 49, pp. 49–66.
  9. Budko D.F., Demina L.L., Novichkova E.A., Polyakova Y.I., Kravchishina M.D., Melenevsky V.N. Postglacial sedimentation in the White Sea (northwestern Russia) reconstructed by integrated microfossil and geochemical data. *Quaternary Research*, 2020, vol. 93, no. 1, pp. 110–123
  10. Strakhovenko V.D., Subetto D., Ovdina E.A., Danilenko I.V., Belkina N., Efremenko N., Maslov A. Mineralogical and geochemical composition of Late Holocene bottom sediments of Lake Onego. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, vol. 46, no. 3, pp. 443–455.
  11. Syso A.I. Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri [Regularities of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2007. 277 p
  12. Balashov, Yu.A. *Geokhimiya redkikh elementov* [Geochemistry of rare earth elements]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 268 p.
  13. Piper D., Bau M. Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2013, vol. 4, no. 10, pp. 69–83.
  14. Germain B., Toucanne S., Skonieczny C., Andre L., Bermell S., Cheron S., Dennielou B., Etoubleau J., Freslon N., Gauchery T., Germain Y., Jorry S., Ménot G., Monin L., Ponzevera E., Rouget M.L., Tachikawa K., Barrat J.-A. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, vol. 170, pp. 17–38.
  15. Chudaeva V.A., Chudaev O.V. Behavior of rare earth elements during mixing of different types of water (Kunashir, the Kurile Islands). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2010, vol. 4, no. 2, pp. 171–186. In Rus.
  16. Shatrov V. A. Lanthanides as indicators of the conditions of Cretaceous phosphorite formation (on the example of the East European Platform). *Reports of the Academy of Sciences*, 2007, vol. 414, no. 1, pp. 90–92. In Rus.
  17. Maslov A.V., Shevchenko V.P. REE–Th systematics of the suspended particulate matter and bottom sediments from the mouth zones of the world rivers of different categories/classes and some large Russian arctic rivers. *Geochemistry International*, 2019, vol. 59, no. 1, pp. 56–73.
  18. Dubinin, A.V. *Geokhimiya redkikh elementov v okeane* [Geochemistry of rare earth elements in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 360 p.
  19. Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyrov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Yv., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Low land across a 700 km latitudinal gradient. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, pp. 5725–5746.
  20. Savenko V.S. On the ratio of biogenic and terrigenous suspension in the ocean. *Reports of the Academy of Sciences*, 1999, vol. 364, no. 2, pp. 251–254. In Rus.
  21. *Obysnitel'nay zapiska k karte chetvertichnykh otlozheniy. Masshtab 1:200000. Seriya Kulundinsko-Barabinskay. List: N-44-I* [Explanatory note to the map of Quaternary deposits. Scale 1:200000. Kulundinsko-Barabinskaya series. Sheet: N-44-I]. Novosibirsk, Zapadno-Sibirskoe knizhnoe izdatelstvo, 1967. 88 p.
  22. Savchenko N.V. *Gidrokhimicheskoe sostoyaniye ozer nizmennykh ravnin Severnoy Evrazii (na primere Zapadnoy Sibiri)* [Hydrochemical state of lakes of lowland plains of Northern Eurasia (on the example of Western Siberia)]. Novosibirsk, Dep. v VINITI, 2004. No. 1266. 364 p.
  23. Taran O.P., Boltenkov V.V., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Delii I.V., Romanov R.E., Strakhovenko V.D. Relations between the Chemical Composition of Organic Matter in Lacustrine Ecosystems and the Genesis of Their Sapropel. *Geochemistry International*, 2018, vol. 56, Iss. 3, pp. 256–265. DOI: 10.1134/S0016702918030096
  24. Strakhovenko, V.D., Ovdina, E.A., Malov, G.I., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Taran, O.P., Boltenkov, V.V. Genesis of organomineral deposits in lakes of the central part of the Baraba lowland (South of West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 9, pp. 1231–1243.
  25. Zarubina E.Yu., Sokolova M.I. Rol zonalnykh faktorov v formirovaniy produktivnosti malyykh ozer uga Ob-Irtyshskogo mezhdurechiya [The role of zonal factors in the formation of productivity of small lakes in the south of the Ob-Irtysh interfluve]. *Ozera Evrazii: problemy i puti resheniy. Materialy 2 mezhdunarodnoy konferentsii* [Lakes of Eurasia: problems and ways of their solution. Proc. II International Conference]. Kazan, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan Publ. House, 2019. P. 1, pp. 80–84.
  26. Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Saltykov A.V. Osobennosti khimicheskogo sostava ozernykh vod i formiruyushikhsya iz nikh raznotipnykh sapropeley na yuge Zapadnoy Sibiri [Features of the chemical composition of lake waters and different types of sapropels formed from them in the South of Western Siberia]. *Vodnye resursy: novye vyzovy i puti resheniy. Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific Conference with International Participation. Water resources: new challenges and solutions]. Novosibirsk, Lik Publ., 2017. pp. 426–431.
  27. Taylor S.R., McLennon S.M. *Kontenentalnaya kora: sostav i ivalutsiya* [The continental crust: its composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 1988. 384 p.
  28. Shatrov V.A., Voitsekhovskiy G.V. On the problem of the behavior of lanthanides in the waters and sedimentary formations of the modern world ocean. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2010, no. 3, pp. 73–83. In Rus.
  29. Shevchenko V.P., Maslov A.V., Stein R. Distribution of some rare and trace elements in ice-rafted sediments in the Yermak plateau area, the Arctic ocean, *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 6, pp. 855–863.

Received: 13 October 2021.

#### Information about the authors

**Vera D. Strakhovenko**, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.  
**Ekaterina A. Ovdina**, researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.

УДК 339.13:553.689.2

## ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ БАРИТОВОГО СЫРЬЯ В РОССИИ

Боярко Григорий Юрьевич<sup>1</sup>,  
gub@tpu.ru

Хатьков Виталий Юрьевич<sup>1,2</sup>,  
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

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

<sup>2</sup> ПАО «Газпром»,  
Россия, 196143, г. Санкт-Петербург, пл. Победы, 2.

**Актуальность** работы обусловлена наличием периодической импортозависимости России по баритовому сырью.

**Цель:** изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) баритового сырья в России и в мировом масштабе, его цен (мировых и российских), сырьевой базы барита России и перспектив ее национального производства.

**Методы:** статистический, графический, логический.

**Результаты.** На основании анализа имеющейся информации сделан вывод, что баритовое минеральное сырье в России является критическим товарным продуктом ввиду ограниченности его добычи на единственном месторождении и наличия значимых объемов импорта барита на границе порога импортозависимости. Малый размер российского импортного товарного потока барита, с одной стороны, легко обеспечивается, с другой – не способен влиять на цены и объемы торговых экспортно-импортных потоков баритового сырья. Предложены меры регулирования баритодобывающей отрасли: возобновление добычных работ на Хойлинской группе баритовых месторождений (Хойлинское, Малохойлинское и Пальникское) в Республике Коми и на техногенном Урском месторождении в Кемеровской области; организация оценочных и разведочных работ на Кутень-Булуком, Моховском, Карасугском-II и Юбилейном месторождениях к северу от выходящего из эксплуатации Толчинского месторождения в Республике Хакасия; первоочередные поиски новых месторождений баритового сырья следует организовать близ имеющихся транспортных инфраструктур на Алчано-Бикинской и Муравьево-Амурской баритоносных площадях в Приморском крае, на Анюйской и Нижне-Амурской площадях в Хабаровском крае, на Сакмарской площади в Республике Башкортостан. Предложено сохранить стабильный импортный товарный поток барита от постоянных партнеров в Республике Казахстан в экономических условиях стран Таможенного союза, а также рассмотреть возможность формирования новых импортных потоков баритового сырья из Индии и Лаоса.

**Ключевые слова:**

Баритовое сырье, импортозависимость, критический товарный продукт, минерально-сырьевая база, проекты.

### Введение

Барит, или «тяжелый шпат», представляет собой природный сульфат бария. Он используется преимущественно в качестве утяжелителя буровых растворов (более 75 % потребления), инертного и слабоактивного наполнителя в лакокрасочной, резиновой, бумажной, стекольной, цементной, строительной промышленности, в производстве пластмасс, керамики (16–18 %) и в качестве химического сырья для производства соединений бария (6–7 %) [1–4].

После распада СССР большая часть источников барита оказались за пределами России – в Казахстане и Грузии. Если в 1980-е гг. потребности нефтегазовой промышленности СССР составляли 550–725 тыс. т/год и на 80–90 % удовлетворялись собственной добычей барита, то в 1990-е гг. в России доля его импорта превысила 50 % [3–8].

Лидерами мировой добычи барита являются Китай, Индия и Марокко, главными экспортёрами – Китай, Индия, Марокко, Турция и Казахстан, ведущими импортёрами – США, Саудовская Аравия, Канада, Кувейт, Норвегия, Германия и Италия. В США, несмотря на значительную собственную добычу барита (400–700 тыс. т/год), ввиду импорта до 87 % его потребления этот товарный продукт относится к крити-

ческим материалам [9]. Такая же ситуация имеет место с баритовым сырьем и в Европейском Союзе, импортирующим до 82 % от его потребления [10]. В Китае, несмотря на его лидерство в добыче, барит также является критическим товарным продуктом [11, 12].

Наличие импортной зависимости по сырью для нужд российской нефтегазовой отрасли требует анализа географии национальной минерально-сырьевой базы барита и предприятий, добывающих и потребляющих баритовое сырье, тенденций спроса и предложения барита на российском и мировом рынках, а также выработки предложений по решению проблемы импортозависимости.

### Методы исследования

С целью изучения российской отрасли производства и потребления барита были обработаны данные по движению их товарных потоков за 1996–2020 гг., по динамике мировых цен и цен российского импорта и экспорта баритового сырья. Источники информации: Государственные доклады Федерального агентства недропользования Российской Федерации [13], базы данных Федеральной службы государственной статистики [14] и Федеральной таможенной службы [15] России, статистические данные ООН [16], обзоры информационных центров [17, 18].

Объемы товарных потоков барита учтены в метрических тоннах, а цены – в долларах США за тонну. Доли импорта определялись по отношению импортных объемов к объемам национального потребления и реализации (потребление+экспорт), доли экспорта – по отношению экспортных объемов к объемам национального производства. Среднемировые цены барита рассчитаны по суммарным объемам и стоимости мирового экспорта и импорта. Запасы и ресурсы барита пересчитана на 100 %  $BaSO_4$ . Темпы годовых изменений во времени абсолютных показателей (объемы, стоимость) определяются в виде сложных процентов, относительных показателей (цены, доли) – в виде простых процентов. Имеются лакуны данных по отдельным периодам, не позволяющие рассчитывать производные величины (цены, доли) – они исключались из вычислений и построений графиков. При различии смежных данных (например, трансграничных продаж по данным экспортеров и импортеров) из них выбиралась наименьшая величина.

### Анализ баритовой отрасли России и мира

Российское потребление барита в 2020 г. составило 299 тыс. т, или 3,4 % от его мирового производства/потребления (8,2 млн т). В международной торговле находится 55–60 % добытого барита. Национальная добыча баритового сырья в России составила в 2020 г. 244 тыс. т. Импортный поток баритового сырья в Россию достигает 64 тыс. т (2020 г.) – на грани порога импортозависимости (25 %).

### Состояние баритовой отрасли в России

На территории России добычу барита в настоящее время осуществляют АО «Барит» и ООО «Боградский ГОК» на Толчинском баритовом месторождении в Республике Хакасия (рис. 1). В 2004 г. была прекращена добыча на Хойлинском баритовом месторождении в Республике Коми (АО «Хойлинский ГОК»), а в 2012 г. прекратил работу АО «Салаирский химический комбинат», разрабатывавший сульфидно-баритовое месторождение Кварцитовая Сопка в Кемеровской области.



**Рис. 1.** Баритонесные провинции, месторождения и проявления барита, предприятия, добывающие и перерабатывающие баритовый продукт: 1 – баритонесные провинции (I – Северо-Кавказская, II – Кольская, III – Уральская, IV – Алтае-Саянская, V – Енисейская, VI – Забайкальская, VII – Сихотэ-Алинская, VIII – Колымская); 2, 3 – баритовые месторождения и проявления (a – с запасами свыше 500 тыс. т  $BaSO_4$  и/или ресурсами свыше 1 млн т  $BaSO_4$ , б – малые месторождения и проявления с небольшими запасами/ресурсами); 2 – собственно баритовые месторождения, 3 – комплексные сульфидно-баритовые месторождения; 4 – техногенные баритовые месторождения; 5 – глубоководные площади распространения баритовых конкреций; 6 – горнодобывающие предприятия, реализующие баритовый концентрат (a – действующие, б – остановленные), 7–10 – предприятия по производству: 7 – баритовых буровых смесей, 8 – рентгенозащитных строительных смесей, 9 – бариевых химикатов, 10 – тонкодисперсных баритовых порошков – наполнителей красок

**Fig. 1.** Barite-bearing provinces, deposits and manifestations of barite, enterprises producing and processing barite products: 1 – barite-bearing provinces (I – North Caucasus, II – Kola, III – Ural, IV – Altai-Sayan, V – Yenisei, VI – Trans-Baikal, VII – Sikhote-Alin, VIII – Kolyma); 2, 3 – barite deposits and manifestations (a – with reserves of more than 500 thousand tons of  $BaSO_4$  and/or resources of more than 1 million tons of  $BaSO_4$ , b – small deposits and manifestations with small reserves/resources); 2 – barite deposits proper, 3 – complex sulfide-barite deposits; 4 – technogenic barite deposits; 5 – deep-water areas of distribution of barite nodules; 6 – mining enterprises that sell barite concentrate (a – active, b – closed), 7–10 – enterprises that produce: 7 – barite drilling mixes, 8 – X-ray protective construction mixes, 9 – barium chemicals, 10 – fine barite powders-paint fillers

Динамика рынка барита в России за период 1996–2020 гг. – на рис. 2. Если в 1996–2007 гг. добыча барита составляла 50–90 тыс. т/год, то с 2008 г. начался ее рост до 434 тыс. т в 2016 г. Среднегодовые изменения объемов добычи барита в России за 1996–2016 гг. составляют +12,8 %/год. В дальнейшем наблюдается спад добычи барита вплоть до 184 тыс. т в 2018 г. Серьезные риски обеспечения поставок баритового сырья на российский рынок проявляются по факту единственного источника – добычи на Толчеинском месторождении с ограниченными остаточными запасами барита (1,2 млн т). При годовой национальной потребности барита в 300–400 тыс. т/год этих запасов хватит лишь на 3–4 года.

Потребление барита за 1996–2016 гг. непрерывно возрастает (с 32 до 420 тыс. т/год), опережая рост объемов национальной добычи баритового сырья. Среднегодовой рост объемов добычи барита в России за 1996–2016 гг. составляет +16,1 %. Позднее потребление баритового сырья ввиду падения цен на нефть и газ, сопровождавшегося сокращением объемов нефтегазового бурения, упало к 2018 г. до нового минимума в 208 тыс. т, а затем вернулось к росту до 299 тыс. т в 2020 г.

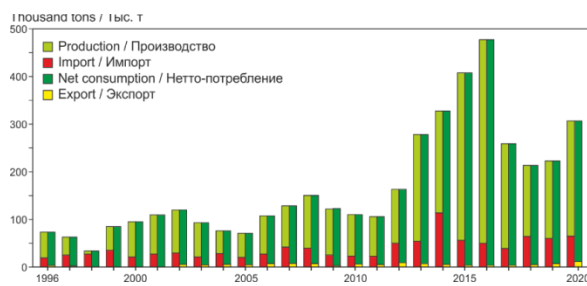


Рис. 2. Баланс рынка барита в России за 1996–2020 гг. Составлено по обобщенным данным [13–18]

Fig. 2. Barite market balance in Russia for 1996–2020. Compiled from generalized data [13–18]

Предприятия, потребляющие барит:

- производители утяжелителей буровых растворов – АО «Ильский завод Утяжелитель – НПО «Бурение» (пос. Ильский Северского района Краснодарского края), ООО «Барит Урала» (г. Челябинск), АО «Спецнефтематериалы» (г. Волгоград), АО «НПО «Полицелл» (г. Владимир), ООО «НПО «Реасиб» (г. Томск);
- производители рентгенозащитных строительных смесей: ООО «Альфапол», ООО «Ажио» и ООО «Гидроцем» в г. Санкт-Петербург, ООО «Сорель» (г. Москва), ООО «Кировградский завод промышленных смесей» (г. Кировоград Свердловской области);
- производители баритовых химикатов: ООО «Эко-тек – Завод химических компонентов» и ООО «Компонент-Реактив» в г. Москва, АО «Химический завод им. Л.Я. Карпова» (г. Менделеевск, Республика Татарстан) ООО «Михайловский завод химических реактивов» (г. Барнаул);
- производители баритовых наполнителей красок – АО «Геоком» (пос. Полотняный Дзержинского района Калужской области).

Перекрытие дефицита потребления компенсируется по импорту. В 1996–2006 гг. импорт барита находился в интервале 20–35 тыс. т/год (рис. 3), но начиная с 2007 г. импортные поставки увеличились до 30–55 тыс. т/год в 2007–2012 гг. и до 40–65 тыс. т/год в 2013–2020 гг. Среднегодовые изменения объемов импорта барита в России за 1996–2020 гг. составляет +4,2 %/год.

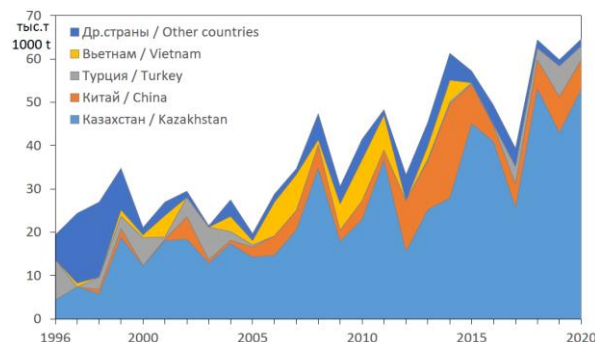


Рис. 3. Динамика импорта барита по странам-экспортёрам за 1996–2020 гг. Составлено по данным ФТС РФ [15]

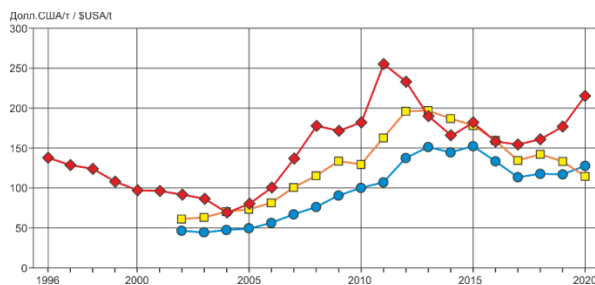
Fig. 3. Dynamics of barite imports by exporting countries for 1996–2020. Compiled according to the Federal Customs Service of the Russian Federation [15]

Основные поставщики барита в Россию – добывающие предприятия Казахстана (АО «Восточное рудоуправление» на Чиганакском месторождении, АО «Жайремский ГОК» на Жайремском месторождении и ТОО «Global Chemicals Company» на месторождении Бестобе), осуществляют непрерывно растущие поставки – вплоть до 53 тыс. т в 2018 г. (в 1990-е гг. 22–30 % российского импорта, в 10-е годы – 55–83 %). Второй по значимости источник барита – Китай, поставляющий в Россию до 22 тыс. т/год. В 2000–2013 гг. осуществлялись поставки баритового сырья из Вьетнама (до 10 тыс. т/год), но в этой стране имеется рост собственного потребления и его отгрузки прекратились. Наоборот в 2017 г. возобновился импорт барита из Турции (до 7 тыс. т/год) после перерыва с 2007 г.

Динамика мировых цен на барит (рис. 4) включает следующие события: стабильный уровень цен экспорта 50–60 \$/т до 2005 гг.; их рост начиная с 2006 г. до в 2000–2012 гг. до 145–150 \$/т в 2013–2016 гг. и снижение до 135–145 \$/т в 2017–2020 гг. Среднемировые цены импорта (SIF) барита выше среднемировых цен экспорта (FOB) на 15–40 %. Российские цены импорта барита на 25–50 % выше среднемировых цен импорта, но в 2013–2014 гг. были ниже мировых на –4...–11 %. В то же время российские цены импорта барита из Казахстана (SIF) лишь на 10–12 % выше цен экспорта Казахстана (FOB), что обусловлено короткой транспортной логистикой поставок.

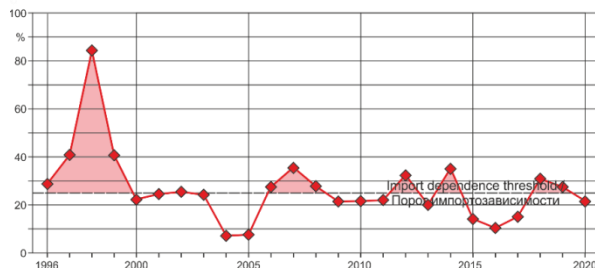
По динамике долей импорта барита (рис. 5) этот продукт включительно по 1999 г. был импортозависимым (до 84 % от потребления), но начиная с 2000 г. (после наращивания национальной добычи) сложилась ситуация, что доля его импорта колеблется на

границы порога импортозависимости (25 %) – от 7 % (2004 г.) до 35 % (2014 г.).



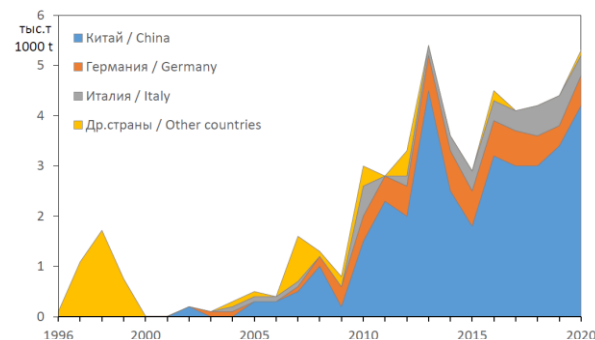
**Рис. 4.** Динамика цен на барит за 1996–2020 гг. Составлено по данным [15–18]. ● – среднмировой экспорт; ■ – среднмировой импорт; ◆ – импорт в Россию

**Fig. 4.** Dynamics of barite prices for 1996–2020. Compiled according to [15–18]. ● – global average export; ■ – global average import; ◆ – import to Russia



**Рис. 5.** Динамика долей импорта (от потребления) барита в Россию за 1996–2020 гг.

**Fig. 5.** Dynamics of the share of imports (from consumption) of barite to Russia for 1996–2020



**Рис. 6.** Динамика импорта сульфата бария (синтетического барита) по странам-экспортерам за 1996–2020 гг. Составлено по данным ФТС РФ [15]

**Fig. 6.** Dynamics of imports of barium sulfate (synthetic barite) by exporting countries for 1996–2020. Compiled according to the Federal Customs Service of the Russian Federation [15]

Кроме природного барита импортируется также синтетический сульфат бария, причем начиная с 2004 г. наблюдается увеличение импортного потока последнего, вплоть до 5,5 тыс. т в 2013 г. (рис. 6). Синтетический сульфат бария используется в производстве рентгенозащитных строительных смесей и катодной массы свинцовых аккумуляторов. Отмечаются и провалы спроса синтетического барита в кризисные 2009

и 2014–2015 гг. Главный экспортер за весь период анализа – Китай. Цены российского импорта синтетического сульфата бария в последние годы составляли 680–790 \$/т при среднемировых ценах его экспорта 390–420 \$/т.

Состояние минерально-сырьевой базы барита в России

Месторождения барита можно разделить на четыре основных типа: стратиформные осадочные; стратиформные вулканогенно-осадочные; метасоматические и остаточные. Геологических формаций баритовых месторождений можно выделить значительно больше [19], но все они укладываются в вышеперечисленные четыре группы. По технологическому признаку выделяют мономинеральные баритовые и комплексные (сульфидно-баритовые) месторождения.

Запасы барита в России по категориям A+B+C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> составляют 19,8 млн т BaSO<sub>4</sub>, прогнозные ресурсы по категориям P<sub>1</sub>+P<sub>2</sub> – 115 млн т BaSO<sub>4</sub> [4].

В разработке в настоящее время находится только одно Толчеинское мономинеральное баритовое месторождение в Республике Хакассия с остаточными запасами на 01.01.2020 г. 1,2 млн т BaSO<sub>4</sub>, что достаточно лишь на 5 лет при текущем уровне добычи.

В июне 2020 г. состоялось начало работы Кызыл-Таштыгского ГОКа на одноименном барит-полиметаллическом месторождении в Республике Тыва с запасами барита 0,868 млн т BaSO<sub>4</sub> по категории C<sub>2</sub> [20], однако технологической схемой предполагается извлечение лишь медных, цинковых и свинцовых концентратов. Отказ в выпуске попутного баритового концентрата в этом проекте обоснован его низким качеством и нерентабельностью его модификации до приемлемых кондиций.

До 2014 г. в Кемеровской области барит выпускался Салаирским ГОКом при разработке барит-полиметаллического месторождения Кварцитовая Сопка (запасы по кат. B+C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> 5,304 млн т BaSO<sub>4</sub>). В июне 2014 г. работы ГОКа были остановлены по решению его владельцев (ООО «УГМК-Холдинг») на основании нерентабельности производства. Выпускаемый Салаирским ГОКом баритовый концентрат (до 40 тыс. т/год) также был невысокого качества, кроме этого, были проблемы с реализацией золотосодержащего свинцового концентрата, переработка которого в России отсутствовала, и основная причина прекращения работы ГОКа – устаревшее и изношенное горное и обогащенное оборудование не обновлялось. В этом районе известны и другие месторождения барит-сульфидных руд: Ново-Урское (запасы по кат. C<sub>2</sub> 1,9 млн т BaSO<sub>4</sub>), Белоключевское (0,4 млн т), Первый Рудник (0,4 млн т), Первомайское (0,3 млн т) и Самойловское (0,11 млн т).

Предлагается проект совместного освоения Гундуйского (4,147 млн т BaSO<sub>4</sub>) и Туркульского (1,552 млн т BaSO<sub>4</sub>) медно-баритовых месторождений в Республике Бурятия с годовым выпуском 70 тыс. т баритового концентрата [21]. Здесь также возможна проблема качества баритовой продукции.

Многочисленные мелкие барит-сульфидные месторождения в Челябинской (Чебачье, Талганское,

Молодежное) и Мурманской (Салланлатва) областях, Алтайском крае (Заречное, Юбилейное, Среднее) и Республике Адыгея (Белореченское) пока не представляют интереса ввиду сложности обогащения их руд и необходимости значительных капитальных затрат на их освоение.

С позиции получения качественного баритового продукта предпочтительно освоение мономинеральных баритовых месторождений.

По запасам баритового сырья в России наиболее значима Хойлинская группа монобаритовых месторождений в Республике Коми. В трех месторождениях (Хойлинское, Малохойлинское и Пальникское) учтены запасы  $\text{BaSO}_4$  по кат.  $\text{V}+\text{C}_1+\text{C}_2$  1,79, 3,58 и 4,59 млн т, соответственно, а также прогнозные ресурсы Уральско-Пайхойской баритоносной площади по кат.  $\text{P}_1+\text{P}_2$  – 16,1 млн т [4, 22]. В 1998 г. была осуществлена попытка освоения Хойлинского месторождения АО «Хойлинский ГОК», но далее пробного выпуска малых партий кускового (недробленного) барита дело не пошло, и в 2004 г. проект был остановлен ввиду высоких эксплуатационных расходов (в условиях Крайнего Севера) и низкой стоимости выпускаемой продукции.

Остаточные месторождения выветривания над барит-сульфидными месторождениями также являются монобаритовыми, к тому же они расположены на дневной поверхности и сложены рыхлыми рудами, что будет способствовать снижению эксплуатационных затрат при их разработке. Однако запасы таких месторождений небольшие. Наибольший интерес представляет месторождение Медведевское (0,631 млн т  $\text{BaSO}_4$ ) в Челябинской области [23], и есть перспективы обнаружения таких месторождений в Республике Башкортостан [24].

Большой интерес представляют баритовые месторождения и проявления, изучение которых остановлено на поисковой стадии, а также перспективные баритоносные площади.

Наиболее значима группа месторождений и проявлений в Республике Хакассия, расположенная к северу от разрабатываемого Толчинского баритового месторождения: Кутень-Будукское (прогнозные ресурсы 3,6 млн т  $\text{BaSO}_4$ ), Моховское (2,5 млн т), Карагукское-II (1,9 млн т), Юбилейное (1,0 млн т), а также другие проявления (1,6 млн т) [4, 25]. Их оценка и разведка может послужить основой для возобновления истощаемой ресурсной базы добывающих компаний АО «Барит» и ООО «Богградский ГОК».

Из перспективных баритоносных площадей следует отметить в первую очередь участки недр близ имеющих транспортных инфраструктур (рис. 1): Сакмарская (прогнозные ресурсы 4,6 млн т  $\text{BaSO}_4$ ) в Республике Башкортостан, Алчано-Бикинская (10,0 млн т) и Муравьево-Амурская (3,6 млн т) в Приморском крае, Анюйская (8,1 млн т) и Нижне-Амурская (3,0 млн т) в Хабаровском крае [4, 26]. Удаленные Урультунская и Ирюдинская баритоносные площади в Магаданской области, несмотря на значительные прогнозные ресурсы (33,7 и 4,0 млн т  $\text{BaSO}_4$ , соответственно), не проглядываются на предмет их освоения. Аналогично,

проблемна Ясинская баритоносная площадь (ресурсы 4,6 млн т  $\text{BaSO}_4$ ) в Красноярском крае, расположенная за крупными водными преградами Енисея и Ангары.

Отдельно следует отметить возможность освоения техногенных месторождений барита, образованных на обогатительных фабриках, извлекавших только сульфидные концентраты [27, 28]. В пос. Урск Гурьевского района Кемеровской области (рис. 1) находится Урское хвостохранилище отходов обогащения руд Ново-Урского барит-полиметаллического месторождения, которое представляет собой мелко измельченную барит-гематит-кварцевую смесь, содержащую до 50 % барита. Ресурсы барита этого хвостохранилища превышают 1,5 млн т в пересчете на  $\text{BaSO}_4$ . Учитывая компактное нахождение хвостов на дневной поверхности, дробленое и измельченное состояние баритсодержащего хвостового материала, исключаются эксплуатационные расходы по добыче и дроблению рудной массы, а затраты на доведение баритовых концентратов до требуемой кондиции будут минимальными. Выход баритового концентрата с этого объекта может составить до 100 тыс. т в год.

Принципиально новым источником баритового сырья могут стать глубоководные хемогенные осадки барита, обнаруженные во впадине Дерюгина в Охотском море (рис. 1) [29]. Они обнаружены на площади до 16 кв. км на глубине залегания 1470–1480 м в виде травертиноподобных скоплений и корок. Ресурсы баритовых осадков составляют до 10 млн т  $\text{BaSO}_4$ , что отвечает средней концентрации баритовых образований до  $600 \text{ кг/м}^2$  [30, 31]. Учитывая, что проекты освоения месторождений глубоководных железомарганцевых конкреций [32, 33] имеют пороговую рентабельность при концентрации марганцевых образований свыше  $5 \text{ кг/м}^2$ , при цене баритовой продукции, сопоставимой с ценами на марганцевый концентрат, будут окупаемыми и проекты разработки глубоководных баритовых осадков. Вопрос лишь в развитии техники и технологии глубоководной добычи твердых полезных ископаемых.

#### Обзор мирового рынка баритового сырья

Баритовые месторождения в геологическом плане достаточно широко распространены и в плане размещения добывающих и потребляющих производств первоначально осваивались наиболее близкие объекты на собственной национальной территории. В первой половине XX в. и добывающие, и перерабатывающие барит производства располагались непосредственно в Германии, Англии, Италии, Франции и США, импортно-экспортные поставки не превышали 20 % от потребления. Использование барита шло в основном на производство лакокрасочного наполнителя (свыше 50 % потребления) и бариевых химикатов.

Если в 1950 г. мировое производство и потребление барита составляло 1,3 млн т, то уже в 1960 г. выросло до 2,8 млн т, а к 2020 – 8,2 млн т (таблица).

Но со временем национальные ресурсы барита сокращались и происходила трансформация товарных потоков от производителей к потребителям.



**Таблица.** Лидеры мирового производства, экспорта, импорта и потребления баритового сырья

**Table.** Leaders in the global production, export, import and consumption of barite raw materials

№	Страны/Countries	Год/Year	№	Страны/Countries	Год/Year	№	Страны/Countries	Год/Year
		1960			1990			2020
Производство, тыс. т/Production, thousand tons								
1	США/USA	700	1	Китай/China	1462	1	Китай/China	2500
2	Германия/Germany	498	2	Индия/India	633	2	Индия/India	2000
3	Мексика/Mexico	271	3	СССР/USSR	500	3	Марокко/Morocco	800
4	Италия/Italy	143	4	США/USA	430	4	Казахстан/Kazakhstan	600
5	Канада/Canada	140	5	Турция/Turkey	367	5	Лаос/Laos	400
6	СССР/USSR	127	6	Марокко/Morocco	364	6	США/USA	400
7	Перу/Peru	110	7	Мексика/Mexico	306	7	Мексика/Mexico	280
8	Франция/France	106	8	Германия/Germany	233	8	Россия/Russia	244
9	Югославия/Yugoslavia	103	9	Болгария/Bulgaria	193	9	Иран/Iran	200
10	Греция/Greece	102	10	Таиланд/Thailand	139	10	Турция/Turkey	200
	Мир, всего/World, total	2809		Мир, всего/ World, total	5654		Мир, всего/World, total	8288
Экспорт, тыс. т/Export, thousand tons								
1	Мексика/Mexico	159	1	Китай/China	1443	1	Индия/India	1460
2	Германия/Germany	136	2	Марокко/Morocco	374	2	Марокко/Morocco	1074
3	Канада/Canada	122	3	Индия/India	304	3	Китай/China	543
4	Греция/Greece	110	4	Турция/Turkey	177	4	Казахстан/Kazakhstan	217
5	Перу/Peru	104	5	Болгария/Bulgaria	160	5	Турция/Turkey	181
6	Югославия/Yugoslavia	103	6	Таиланд/Thailand	105	6	Иран/Iran	162
7	Марокко/Morocco	56	7	Ирландия/Irish	101	7	Нидерланды/Netherlands	129
8	Бразилия/Brazil	48	8	Франция/France	78	8	Таиланд/Thailand	103
9	Италия/Italy	34	9	Нидерланды/Netherlands	73	9	Мексика/Mexico	101
10	Испания/Spain	25	10	Бельгия/Belgium	52	10	Пакистан/Pakistan	92
	Мир, всего/World, total	973		Мир, всего/ World, total	3126		Мир, всего/World, total	4442
№	Страны/Countries	Год Year	№	Страны/Countries	Год Year	№	Страны/Countries	Год Year
		1960			1990			2020
Импорт, тыс. т/Import, thousand tons								
1	США/USA	582	1	США/USA	988	1	США/USA	1046
2	СССР/USSR	60	2	Германия/Germany	232	2	Сауд. Аравия/Saudi Arabia	633
3	Франция/France	56	3	Англия/England	217	3	Кувейт/Kuwait	208
4	Англия/England	46	4	Норвегия/Norway	194	4	Канада/Canada	160
5	Нидерланды/Netherlands	37	5	СССР/USSR	123	5	Нидерланды/Netherlands	133
6	Бельгия/Belgium	35	6	Япония/Japan	116	6	Таиланд/Thailand	128
7	Тринидад и Табаго Trinidad & Tobago	28	7	Нидерланды/ Netherlands	95	7	Норвегия/Norway	118
8	Япония/Japan	18	8	Индонезия/Indonesia	82	8	Италия/Italy	96
9	Венесуэла /Venezuela	18	9	Венесуэла /Venezuela	81	9	Оман/Oman	93
10	Германия/Germany	15	10	Италия/Italy	74	10	Германия/Germany	91
	Мир, всего/World, total	950		Мир, всего/World, total	2575		Мир, всего/World, total	3558
Потребление, тыс. т/Consumption, thousand tons								
1	США/USA	1080	1	США/USA	1434	1	Китай/China	2046
2	Германия/Germany	377	2	СССР/USSR	623	2	США/USA	1707
3	СССР/USSR	188	3	Германия/Germany	428	3	Сауд. Аравия/Saudi Arabia	628
4	Мексика/Mexico	113	4	Индия/India	329	4	Индия/India	551
5	Италия/Italy	110	5	Мексика/Mexico	301	5	Россия/Russia	289
6	Англия/England	103	6	Англия/England	260	6	Канада/Canada	282
7	Алжир/Algeria	65	7	Турция/Turkey	190	7	Кувейт/Kuwait	207
8	Китай/China	61	8	Норвегия/Norway	178	8	Мексика/Mexico	179
9	Япония/Japan	41	9	Япония/Japan	134	9	Германия/Germany	131
10	Нидерланды/Netherlands	37	10	Италия/Italy	109	10	Норвегия/Norway	115
	Мир, всего/World, total	2809		Мир, всего/World, total	5654		Мир, всего/World, total	8288

В конце 1950-х гг. началось резкое увеличение потребления барита в качестве утяжелителя буровых растворов, что привело к увеличению его добычи в крупных нефтегазодобывающих странах (США, СССР, Мексика, Канада), появлению новых экспортных потоков (из Марокко, Мексики, Канады и других стран), импортных потоков в другие добывающие страны (Алжир, Венесуэла, Тринидад/Табаго), а также формирование транзитных потоков баритового сырья через Нидерланды, Бельгию и Сингапур.

Безусловный лидер потребления барита – США (максимум 3,2 млн т в 2008 г.), несмотря на наращивание его добычи (до 2,6 млн т в 1981 г.), в 1985 г. стали нетто-импортером баритового сырья, к 2019 г. доведя долю импорта до 87 % от потребления.

Германия – в 1960 г. второй по значимости потребитель барита – снизила уровень добычи и, несмотря на сокращение потребления, в 1979 г. стала нетто-импортером, ввезя в 2020 г. 70 % от его потребления.

СССР наращивал потребление баритового сырья вплоть до максимума в 0,85 млн т в 1978 г., но после 1991 г. произошло разделение товарных потоков новых стран СНГ, и Россия, Азербайджан и Туркменистан стали импортозависимыми по сырью, а Казахстан – экспортером барита.

Китай, добывший в 1955 г. всего 25 тыс. т баритового сырья, интенсифицировал в 1980-е гг. работы по развитию баритодобывающей отрасли и наращивает объемы его добычи вплоть до максимума в 5,0 млн т в 2008 г. Параллельно росли объемы экспорта барита с максимумом в 2008 г. (3,8 млн т) и его национального потребления (преимущественно лакокрасочного наполнителя), составившего в 2020 г. 2,0 млн т. С 1980 по 2017 гг. Китай был мировым лидером международной торговли баритом.

Индия также начала интенсифицировать добычу баритового сырья в 1975 г., доведя ее до максимума в 2,3 млн т в 2010 г. Большая часть добытого барита идет на экспорт, и начиная с 2018 г. Индия стала мировым лидером международной торговли баритового сырья. Национальное потребление барита в Индии находится на уровне 0,5–0,6 млн т/год.

Марокко, начав в 1958 г. разработку баритовых месторождений, полностью ориентировало экспортное направление этого сырья. Длительное время (1980–2005 гг.) уровень добычи и экспорта барита составлял 0,4–0,5 млн т/год, в дальнейшем он увеличился до 0,7–1,2 млн т/год, и Марокко традиционно занимает третье место в международной торговле баритовым сырьем.

Мексика, имея собственное значимое потребление барита (до 0,5 млн т в 2004 г.), всегда была его нетто-экспортером (0,2–0,4 млн т/год), но в 1997 г. практически прекратила экспорт баритового сырья для обеспечения собственных потребностей и только в 2011 г. возобновила экспортные поставки.

Турция, располагаясь вблизи европейских потребителей, с 1973 г. по настоящее время добывала и поставляла на экспорт 100–300 тыс. т/год, оставляя для собственного потребления 50–100 тыс. т/год.

Многие страны-экспортеры баритового сырья ввиду истощения собственных месторождений практически ушли с этого рынка международной торговли: Югославия в 1966 г., Германия в 1973 г., Греция в 1976 г., Перу в 1984 г., Таиланд в 1991 г., Ирландия в 1995 г. и Болгария в 2009 г.

Канада, длительное время экспортировавшая большую часть добытого баритового сырья (200–300 тыс. т/год), в 1972 г. резко сократила его внешние поставки, а с 2000 г. стала и нетто-импортером барита для нужд собственной нефтегазовой отрасли.

Появились новые добывающие баритовое сырье страны: Казахстан (до 600 тыс. т/год), Иран (до 450 тыс. т/год) и Лаос (до 400 тыс. т/год).

Норвегия, начавшая осваивать нефтегазовые месторождения Северного моря, с 1979 г. импортирует значительные объемы баритового сырья (100–300 тыс. т/год).

В последние годы ввиду истощения длительно разрабатываемых нефтяных месторождений значительно возросли объемы эксплуатационного бурения

и произошло увеличение потребления баритового утяжелителя (и соответственно – импорта) не только в США, Канаде, России, но и в Саудовской Аравии (до 1,2 млн т/год), Казахстане (до 390 тыс. т/год), Кувейте (до 215 тыс. т/год), Аргентине (до 180 тыс. т/год), Индонезии (до 150 тыс. т/год) и ОАЭ (до 80 тыс. т/год).

Доля международной торговли баритовым сырьем от производства/потребления, составлявшая до 1980 г. 30–35 %, в 1980-е гг. увеличилась до 50 %, а в XXI в. – до 55–60 %.

Сложилась ситуация, что основные лидеры баритового рынка имеют большой отрыв по объемам от других его участников: по добыче – Китай, Индия и Марокко, по экспорту – Индия, Китай и Марокко, по импорту США и Саудовская Аравия, по потреблению США, Китай и Саудовская Аравия.

Россия входит в десятку мировых лидеров по производству и потреблению баритового сырья. Объемы российского импортного товарного потока барита не велики по отношению к его мировой торговле (0,8–1,2 %). С одной стороны, дефицит сравнительно легко обеспечивается импортом (в нашем случае из Казахстана). С другой стороны, такие малые объемы импортного потока не способны влиять на цены и объемы главных торговых экспортно-импортных операций по баритовому сырью, формируемых взаимоотношениями крупных экспортеров (Индия, Китай и Марокко) и импортеров (США и Саудовская Аравия). Кроме этого, серьезным фактором для российского импорта является транспортная логистика, когда большинство потребителей баритового сырья находятся далеко от морских портов и транспортировка казахского барита становится предпочтительней и по ценам, и по срокам поставок. Доля казахского экспорта барита в Россию составляет 55–83 %, доля российского импорта в экспорте баритового сырья Казахстана – 30–50 %.

#### Обсуждение результатов

Учитывая, что объемы буровых работ при разведке и обустройстве нефтяных и газовых месторождений России будут оставаться на высоком уровне, проблема дефицита спроса на баритовое сырье остается актуальной. Она усугубляется тем, что в разработке находится всего одно месторождение барита, запасов которого достаточно лишь на 5–6 лет эксплуатации. Тем не менее есть все предпосылки ее решения путем интенсификации поисково-разведочных работ новых богатых месторождений барита и последующего вовлечения их в производство, а также за счет внедрения новых технологий обогащения баритового концентрата, снижающих его потери.

Снизить риски коллапса национальной добычи барита и купировать зависимость от импорта баритового сырья возможно в результате следующих действий:

- поиски и освоение новых баритовых месторождений с высококачественными рудами;
- внедрение новых технологий обогащения и переработки баритового сырья;
- сохранение стабильного импортного потока барита из Казахстана и организация новых импортных потоков баритового сырья.

1. *Поиски и освоение новых баритовых месторождений с высококачественными рудами.* Вблизи действующего Толчеинского рудника в Хакасии имеется группа перспективных монобаритовых месторождений: Кутень-Булуцкое, Моховское, Карасугское-II и Юбилейное. Требуется осуществить оценку и разведку этих месторождений с последующим вовлечением в эксплуатацию.

Возможно возобновление разработки Хойлинской группы баритовых месторождений (Хойлинское, Малохойлинское и Пальникское) в Республике Коми. Со времени останковки Хойлинским ГОКом добычи барита в 2004 г. цены российского импорта баритового сырья увеличились с 85–100 до 140–150\$США/т к 2020 г., поэтому рентабельность этого проекта может быть выше.

Возможно обнаружение и новых месторождений барита, как в пределах известных Алтае-Саянской и Полярно-Уральской баритоносных провинций, так и на новых площадях, которые ранее в качестве перспективных на барит не рассматривались – Дальневосточной (в Хабаровском и Приморском краях), Уральской (Южный и Средний Урал), Забайкальской (Забайкальский край, Республика Бурятия), Енисейской (Красноярский край) и Колымской (Магаданская область, Республика Саха-Якутия). Первоочередные поисковые работы следует организовать близ имеющихся транспортных инфраструктур на Алчано-Бикинской и Муравьево-Амурской баритоносных площадях в Приморском крае, на Анюйской и Нижне-Амурской площадях в Хабаровском крае, на Сакмарской площади в Республике Башкортостан.

2. *Внедрение новых технологий обогащения и переработки баритового сырья.* Для всех освоенных комплексных месторождений барита серьезной проблемой является низкий показатель извлечения барита в концентрат [34, 35]. Это результат нахождения барита в тесном сростании с другими минералами, в первую очередь с гематитом. Наиболее актуальной задачей обогащения является проблема раскрытия сростков зерен барита с примесями, которая может быть решена с использованием электроимпульсного дробления или ультразвуковой диспергации. Возможным решением может быть создание новых технических условий на коллективный барит-гематитовый концентрат, пригодный для производства утяжелителя буровых растворов, и также их новых композиций [36].

Экономически оправдан передел дешевых низкосортных баритовых концентратов на более дорогой товарный сульфат бария путем его обработки серной кислотой или растворением их расплава с хлоридами натрия [37, 38]. Возможно также создание технологической цепочки передела баритовых огарков (продуктов пирометаллургического передела сульфидных руд) с получением синтетического сульфата бария [39, 40].

3. *Сохранение стабильного импортного потока барита из Казахстана и организация новых импортных потоков баритового сырья.* В настоящее время главным зарубежным поставщиком барито-

вого сырья является Казахстан, поставляя в Россию до 90 тыс. т/год. Одновременно он осуществляет экспортные поставки в Туркменистан (до 100 тыс. т/год), Азербайджан (до 55 тыс. т/год) и Узбекистан (до 40 тыс. т/год). В экономических условиях стран Таможенного союза организация стабильного товарного потока баритового сырья от постоянных партнеров в Республике Казахстан является малорисковой альтернативой политике импортозамещения.

Возможно возобновление импортных поставок барита из Вьетнама и формирование новых импортных потоков баритового сырья из Индии и Лаоса.

#### Выводы

1. Баритовое минеральное сырье в России является критическим товарным продуктом ввиду ограниченности его добычи на одном Толчеинском месторождении в Республике Хакассия и наличия значимых объемов импорта барита на границе порога импортозависимости.
2. В международной торговле баритовым сырьем по экспорту лидируют Индия, Китай и Марокко, а по импорту – США и Саудовская Аравия, причем доля мирового экспорта/импорта составляет 55–60 % от мирового производства/потребления. Россия входит в десятку мировых лидеров по производству и потреблению. Малый размер российского импортного товарного потока барита (0,8...1,2 % от международной торговли), с одной стороны, легко обеспечивается (в т. ч. и из второстепенных источников сырья), с другой стороны – не способен влиять на цены и объемы главных торговых экспортно-импортных потоков баритового сырья.
3. Сырьевая база баритового сырья в России проблемна ввиду нахождения наиболее перспективных месторождений и баритоносных площадей в удаленных районах Крайнего севера (в Магаданская область, Республика Коми, Ненецкий АО). Многие баритовые месторождения требуют геологического доизучения (оценки и разведки), аналогично необходимы поисковые работы на новых баритоносных площадях.
4. Решение проблемы критического состояния производства барита в России возможно путем возобновления добычных работ на Хойлинской группе баритовых месторождений (Хойлинское, Малохойлинское и Пальникское) в Республике Коми и на техногенном Урском месторождении в Кемеровской области. Необходимо произвести оценку и разведку известной группы баритовых месторождений (Кутень-Булуцкое, Моховское, Карасугское-II и Юбилейное) к северу от выбывающего из эксплуатации Толчеинского месторождения в Республике Хакассия. Первоочередные поиски новых месторождений баритового сырья следует организовать близ имеющихся транспортных инфраструктур на Алчано-Бикинской и Муравьево-Амурской баритоносных площадях в Приморском крае, на Анюйской и Нижне-Амурской площадях

в Хабаровском крае, на Сакмарской площади в Республике Башкортостан.

5. Следует сохранить стабильный импортный товарный поток барита от постоянных партнеров в Рес-

публике Казахстан в экономических условиях стран Таможенного союза, а также рассмотреть возможность формирования новых импортных потоков баритового сырья из Китая, Индии и Лаоса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bearden S.D. Barite: World sources and the US market / Mining Engineering. – 1997. – V. 49. – № 11. – P. 87–88.
2. Ellis R. Barite – a vital ingredient // Mining Magazine. – 2004. – V. 188. – № 5. – P. 38–39.
3. Петров И.М. Тенденции и особенности развития мирового и российского рынков обогащаемых видов неметаллического минерального сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2010. – № 6. – С. 68–71.
4. Ахманов Г.Г., Егорова И.П., Булаткина Т.А. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы барита // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2017. – № 6. – С. 4–14.
5. Сырьевая база барита и перспективы ее развития / Г.Г. Ахманов, Н.Г. Васильев, Т.А. Булаткина, И.П. Егорова // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 1995. – № 5. – С. 13–18.
6. Ведерников Н.Н., Аксенов Е.М. Социально-экономическая значимость и пути развития минерально-сырьевой базы нерудных полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. – 2003. – № 3. – С. 2–7.
7. Хатьков В.Ю. Состояние производства и потребления барита в России // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 8. – С. 141–142.
8. Доценко Н.П. Баритовая зависимость России. Миф или реальность? // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 3. – С. 332–335.
9. Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply / K.J. Schulz, J.H. DeYoung, R.R. Seal, D.C. Bradley. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2017. – 862 p. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802> (дата обращения 21.06.2021).
10. Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Critical Raw Materials Factsheets. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. – 515 p. URL: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (дата обращения 21.06.2021).
11. Analysis of strategic (critical) mineral resources situation in China and the U.S. and the EU / J.B. Chen, W.M. Huo, D.D. Feng et al. // Natural Resource Economics of China. – 2020. – V. 33. – № 8. – P. 9–17.
12. Jiang Y., Wang T., Long T. Research on listing barite as a strategic mineral resource // Acta Geoscientia Sinica. – 2021. – V. 42. – № 2. – P. 297–302.
13. Государственные доклады «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». 2000–2019 гг. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyy\\_doklady\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevy\\_kh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyy_doklady_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevy_kh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения 21.06.2021).
14. Федеральная служба государственной статистики России. URL: <https://gks.ru/emiss> (дата обращения: 21.06.2021).
15. Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.gov.ru/analysis> (дата обращения: 21.06.2021).
16. A world of information. UNdata. URL: <https://data.un.org/> (дата обращения: 21.06.2021).
17. Минерал. Информационно-аналитический центр «Минерал». URL <http://www.mineral.ru/Center/index.html> (дата обращения: 21.06.2021).
18. TrendEconomy. URL: [dataexplorer \(trendecconomy.ru\)](http://dataexplorer.trendeconomy.ru) (дата обращения: 21.06.2021).
19. Касымов М.А. Формационные типы баритовых месторождений // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова. – 2014. – № 33. – С. 108–112.
20. Войтов М.Д., Вети А.А. Анализ запасов Кызыл-Ташгыского полиметаллического месторождения, для обоснования строительства рудника // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 6 (94). – С. 45–48.
21. Республика Бурятия. Инвестиционный портал Республики Бурятия. Минерально-сырьевой комплекс. URL: <https://invest-buryatia.ru/index/investiczionnyie-predlozheniya/mineralno-syirevoj-kompleks/> (дата обращения: 21.06.2021).
22. Кузнецов Д.С. Баритовые месторождения Республики Коми и перспективы их освоения // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера. – Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2018. – С. 46–50.
23. Техничко-экономические аспекты промышленного освоения Медведевского месторождения барита / В.И. Ноздря, Д.В. Саморуков, А.Н. Богачев, Н.В. Шегай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 3. – С. 332–336.
24. Месторождения остаточного типа Республики Башкортостан – основа для создания сырьевой базы «небурового» барита / Г.Г. Ахманов, Т.А. Булаткина, И.П. Егорова, И.А. Кузьмина, А.В. Кочергин, Н.Р. Галимов // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 6. – С. 14–8.
25. Новый тип месторождений барита в Хакасии / Г.Г. Ахманов, Н.Г. Васильев, И. П. Егорова, Ф.И. Ходаковский, Е.С. Единцев // Отечественная геология. – 2007. – № 3. – С. 65–70.
26. Ахманов Г.Г., Егорова И.П., Васильев Н.Г. Дальний Восток – новая перспективная на барит провинция // Разведка и охрана недр. – 2003. – № 3. – С. 24–28.
27. Upgradation of barite waste to marketable grade concentrate / R. Singh, B. Banerjee, K.K. Bhattacharyya, J.P. Srivastava // IMPC 2006 – Proceedings of 23rd International Mineral Processing Congress. – Istanbul: Turkey, 2006. – P. 2303–2307.
28. Recovery of lead and barite from the abandoned Ichmoul mine wastes in Algeria / N. Larachi, A. Bali, M. Ould Hamou, S. Bensaadi // Environmental Earth Sciences. – 2019. – V. 78. – № 20. – Article no 601. DOI: 10.1007/s12665-019-8593-5.
29. Baranov B., Aloisi V., Degrachev A. Giant barite deposit mapped and the Derugin Basin (Okhotsk Sea) // Minerals of the Ocean – integrated strategies – 2 Conference abstract. – St-Petersburg, 2004. – P. 214.
30. Современные геологические процессы и условия формирования баритовой залежи в котловине Дерюгина Охотского моря / А.С. Астахов, В.В. Ивин, В.Н. Карнаух, А.А. Коптев, Б.Я. Ли, Е.Н. Суховеев // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 2. – С. 200–214.
31. Геология и полезные ископаемые дальневосточных морей России / С.И. Андреев, В.Е. Казакова, А.М. Иванова, А.Н. Смирнов // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. – СПб: ВНИИ геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, 2018. – С. 444–454.
32. Lusty P.A.J., Murton V.J. Deep-ocean mineral deposits: metal resources and windows into earth processes // Elements. – 2018. – V. 14. – № 5. – P. 301–306. DOI: 10.2138/gselements.14.5.301.
33. Metal extraction from deep-ocean mineral deposits / M.V. Zubkov, P.K. Plucinski, A.C.Y. Dartiguelongue, P.A.J. Lusty // Elements. – 2018. – V. 14. – № 5. – P. 319–324. DOI: 10.2138/gselements.14.5.319
34. Гершенкоп А.Ш., Хохуля М.С., Конторина Т.А. Разработка технологии гравитационно-магнитного обогащения барит-сидеритовых руд месторождения Салланлатва // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 10. – С. 358–364.
35. Высотин В.В. Разработка технологии флотации барита из золото-баритовой руды с использованием комплексного собирателя: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2008. – 121 с.
36. Перейма А.А., Дубов Н.М., Черкасова В.Е. Буровой раствор на биополимерной основе для проводки скважин в условиях АВПД // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 4. – С. 34–38.
37. Ермуханова С.Т., Лыгина Т.З. Основные технологии получения сульфата бария из природного барита // Actualscience. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 98–100.

38. Yermukhanova S.T., Khatsrinov A.I. The most important technologies of receiving barium sulfate from barite // European Science. – 2020. – № 6 (55). – P. 30–34.
39. Steele B.C.H., Heinzl A. Materials for fuel-cell technologies // Nature. – 2001. – № 414. – P. 345–352. DOI: 10.1038/35104620.
40. Sokolovskaya L.V., Kvyatkovskiy S.A., Semenova A.S. Barite phase formations during lead and zinc oxidized ores sintering // Integrated use of mineral raw materials. – 2018. – № 1 (304). – P. 35–43.

*Поступила 21.06.2021 г.*

#### **Информация об авторах**

**Боярко Г.Ю.**, доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, отделение нефтегазового дела Инженерной Школы природных ресурсов Национальный исследовательский Томский политехнический университет

**Хатьков В.Ю.**, начальник департамента, ПАО Газпром; соискатель отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета

UDC 339.13:553.689.2

## CURRENT STATE OF PRODUCTION AND CONSUMPTION OF BARITE RAW MATERIALS IN RUSSIA

**Grigory Yu. Boyarko**<sup>1</sup>,  
gub@tpu.ru

**Vitaly Yu. Khatkov**<sup>1,2</sup>,  
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

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

<sup>2</sup> Gazprom PJSC,  
2, Pobedy square, St. Petersburg, 196143, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the presence of periodic import dependence of Russia on barite raw materials.

**Objective:** study of the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of barite raw materials in Russia and on a global scale, its prices (world and Russian), the raw material base of barite in Russia and the prospects for its national production.

**Methods:** statistical, graphical, logical.

**Results.** Based on the analysis of the available information, it is concluded that barite mineral raw materials in Russia are a critical commodity product due to the limited production at a single field and the presence of significant volumes of barite imports at the border of the import dependence threshold. On the one hand, the small size of the Russian import barite commodity flow is easily ensured, on the other hand, it is not able to influence the prices and volumes of trade export–import flows of barite raw materials. The following measures are proposed to regulate the barite mining industry: the resumption of mining operations at the Khoylinsky group of barite deposits (Khoylinsky, Malokhoylinsky and Palnikskoe) in the Komi Republic and at the technogenic Urskoe field in the Kemerovo region; the organization of evaluation and exploration work at the Kuten-Buluksky, Mokhovsky, Karasugsky-II and Yubileyny fields to the north of the decommissioned Tolcheinsky field in the Republic of Khakassia; priority searches for new deposits of barite raw materials should be organized near the existing transport infrastructure in the Alchano-Bikinskaya and Muravyevo-Amur baritone-bearing areas in the Primorsky Territory, on Anyuyskaya and Nizhne-Amurskaya areas in the Khabarovsk Territory, on Sakmarskaya Square in the Republic of Bashkortostan. It is proposed to maintain a stable import commodity flow of barite from permanent partners in the Republic of Kazakhstan in the economic conditions of the Customs Union countries, as well as to consider the possibility of forming new import flows of barite raw materials from India and Laos.

### Key words:

Barite raw materials, import dependence, critical commodity product, mineral resource base, projects.

### REFERENCES

1. Bearden S.D. Barite: World sources and the US market. *Mining Engineering*, 1997, vol. 49, no. 11, pp. 87–88.
2. Ellis R. Barite – a vital ingredient. *Mining Magazine*, 2004, vol. 188, no. 5, pp. 38–39.
3. Petrov I.M. Trends and features of the development of the world and Russian markets for enriched types of non-metallic mineral raw materials. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2010, no. 6, pp. 68–71. In Rus.
4. Akhmanov G.G., Egorova I.P., Bulatkina T.A. State and prospects of development of the mineral resource base of barite. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2017, no. 6, pp. 4–14. In Rus.
5. Akhmanov G.G., Vasiliev N.G., Bulatkina T.A., Egorova I.P. Raw material base of barite and prospects for its development. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 1995, no. 5, pp. 13–18. In Rus.
6. Vedernikov N.N., Aksenov E.M. Socio-economic significance and ways of development of the mineral resource base of non-metallic minerals. *Prospect and protection of mineral resources*, 2003, no. 3, pp. 2–7. In Rus.
7. Khatkov V.Yu. Sostoyanie proizvodstva i potrebleniya barita v Rossii [State of production and consumption of barite in Russia]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2004, no. 8, pp. 141–142.
8. Dotsenko N.P. Russia's barite dependence. Myth or reality? *Mining informational and analytical bulletin*, 2005, no. 3, pp. 332–335. In Rus.
9. Schulz K.J., DeYoung J.H., Seal R.R., Bradley D.C. *Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2017. 862 p. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802> (accessed 21 June 2021).
10. *Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 2017. 515 p. Available at: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1> (accessed 21 June 2021).
11. Chen J.B., Huo W.M., Feng D.D. Analysis of strategic (critical) mineral resources situation in China and the U.S. and the EU. *Natural Resource Economics of China*, 2020, vol. 33, no. 8, pp. 9–17. In Chin.
12. Jiang Y., Wang T., Long T. Research on listing barite as a strategic mineral resource. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, vol. 42, no. 2, pp. 297–302. In Chin.
13. *Gosudarstvennye doklady «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiyskoy Federatsii»* [Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. State report «State and use of mineral resources of the Russian Federation in 2000–2019]. Available at: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno-syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno-syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (accessed 21 June 2021).
14. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Rossii. Bazy dannykh* [Federal State Statistic Service. Databases]. Available at: <https://gks.ru/emiss> (accessed 21 June 2021).
15. *Federalnaya tamozhennaya sluzhba Rossii. Bazy dannykh* [Federal customs service. Databases]. Available at: <http://stat.customs.gov.ru/analysis> (accessed 21 June 2021).
16. UNdata. *In world of information*. Available at: <https://data.un.org/> (accessed 21 June 2021).
17. *Informatsionno-analiticheskiy tsentr «Mineral»* [Information and analytical center «Mineral»]. Available at: <http://www.mineral.ru/Center/index.html> (accessed 21 June 2021).
18. TrendEconomy. *Annual statistics on international trade in goods*. Available at: [dataexplorer \(trendconomy.ru\)](https://dataexplorer.trendeconomy.ru/) (accessed 21 June 2021).

19. Kasymov M.A. Formation types of barite deposits. *Bulletin of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*, 2014, no. 33, pp. 108–112. In Rus.
20. Voitov M.D., Veti A.A. Analysis of the reserves of the Kyzyl-Tashtyg polymetallic deposit, to justify the construction of the mine. *Bulletin of the Kuzbass state technical university*, 2012, no. 6 (94), pp. 45–48. In Rus.
21. *Respublika Buryatiya. Investitsionny portal Respubliki Buryatiya. Mineralno-syrevoy kompleks* [Republic of Buryatia. Investment portal of the Republic of Buryatia. Mineral-raw material complex] Available at: URL <https://invest-buryatia.ru/index/investitsionnyie-predlozheniya/mineralno-syrevoj-kompleks/> (accessed 21 June 2021).
22. Kuznetsov D.S. Baritovye mestorozhdeniya Respubliki Komi i perspektivy ih osvoeniya [Barite deposits of the Komi Republic and prospects for their development]. *Aktualnye problemy, napravleniya i mekhanizmy razvitiya proizvoditelnykh sil Severa* [Actual problems, directions and mechanisms of development of the productive forces of the North]. Syktyvkar, Komi Republican Printing House, 2018. pp. 46–50.
23. Nozdrya V.I., Samorukov D.V., Bogachev A.N., Shegai N.V. Technical and economic aspects of the industrial development of the Medvedevsky barita deposit. *Mining informational and analytical bulletin*, 2004, no. 3, pp. 332–336. In Rus.
24. Akhmanov G.G., Bulatkina T.A., Egorova I.P., Kuzmina I.A., Kochergin A.V., Galimov N.R. Deposits of the residual type of the Republic of Bashkortostan are the basis for creating a raw material base of «non-drilling» barite. *Exploration and protection of mineral resources*, 2019, no. 6, pp. 14–18. In Rus.
25. Akhmanov G.G., Vasiliev N.G., Egorova I.P., Khodakovskiy F.I., Edintsev E.S. A new type of barite deposits in the Republic of Khakassia. *National Geology*, 2007, no. 3, pp. 65–70. In Rus.
26. Akhmanov G.G., Egorova I.P., Vasiliev N.G. The Far East – a new promising province on barite. *Prospect and protection of mineral resources*, 2003, no. 3, pp. 24–28. In Rus.
27. Singh R., Banerjee B., Bhattacharyya K.K., Srivastava J.P. Up-gradation of barite waste to marketable grade concentrate. *IMPC 2006 – Proceedings of 23rd International Mineral Processing Congress*. Istanbul, Turkey, 2006. pp. 2303–2307.
28. Larachi N., Bali A., Ould Hamou M., Bensaadi S. Recovery of lead and barite from the abandoned Ichmoul mine wastes in Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 2019, vol. 78, no. 20. no article 601. DOI: 10.1007/s12665-019-8593-5.
29. Baranov B., Aloisi V., Degrachev A. Giant barite deposit mapped and the Derugin Basin (Okhotsk Sea). *Minerals of the Ocean – integrated strategies – 2 Conference abstract*. St-Petersburg, 2004. pp. 214.
30. Astahov A.S., Ivin V.V., Karnauh V.N., Koptev A.A., Li B.Ya., Suhoveev E.N. Modern geological processes and conditions for the formation of a barite deposit in the Deryugin basin of the Sea of Okhotsk. *Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 200–214.
31. Andreev S.I., Kazakova V.E., Ivanova A.M., Smirnov A.N. Geologiya i poleznye iskopaemye dalnevostochnykh morey Rossii [Geology and minerals of the Far Eastern seas of Russia]. *70 let v Arktike, Antarktike i Mirovom okeane* [70 years in the Arctic, Antarctic and the World Ocean]. St. Petersburg, Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean named after Academician I.S. Gramberg Publ., 2018. pp. 444–454.
32. Lusty P.A.J., Murton B.J. Deep-ocean mineral deposits: metal resources and windows into earth processes. *Elements*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 301–306. DOI: 10.2138/gselements.14.5.301.
33. Zubkov M.V., Plucinski P.K., Dartiguelongue A.C.Y., Lusty P.A.J. Metal extraction from deep-ocean mineral deposits. *Elements*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 319–324. DOI: 10.2138/gselements.14.5.319.
34. Gershenkop A.Sh., Khokhulya M.S., Kontorina T.A. Development of the technology of gravity-magnetic enrichment of barite-siderite ores of the Sallanlatva deposit. *Mining informational and analytical bulletin*, 2007, no. 10, pp. 358–364. In Rus.
35. Vysotin V.V. *Razrabotka tekhnologii flotatsii barita iz zoloto-baritovoy rudy s ispolzovaniem kompleksnogo sobiratelya*. Dis. Kand. nauk [Development of technology for flotation of barite from gold-barite ore using an integrated collector. Cand. Diss.]. Irkutsk, 2008. 121 p.
36. Pereima A.A., Dubov N.M., Cherkasova V.E. Biopolymer-based drilling mud for drilling wells in WUA conditions. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2010, no. 4, pp. 34–38. In Rus.
37. Ermukhanova S.T., Lygina T.Z. Basic technologies for the production of barium sulfate from natural barite. *Actualscience*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 98–100. In Rus.
38. Yermukhanova S.T., Khatsrinov A.I. The most important technologies of receiving barium sulfate from barite. *European Science*, 2020, no. 6 (55), pp. 30–34.
39. Steele B.C.H., Heinzl A. Materials for fuel-cell technologies. *Nature*, 2001, no. 414, pp. 345–352. DOI: 10.1038/35104620.
40. Sokolovskaya L.V., Kvyatkovskiy S.A., Semenova A.S. Barite phase formations during lead and zinc oxidized ores sintering. *Integrated use of mineral raw materials*, 2018, no. 1 (304), pp. 35–43.

Received: 21 June 2021.

#### Information about the authors

**Grigory Yu. Boyarko**, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vitaly Yu. Khatkov**, department head, Gazprom PJSC; degree applicant, Oil and Gas Department of the Engineering School, National Research Tomsk.

УДК 622.276.43

## ОСОБЕННОСТИ ВЫРАБОТКИ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ НЕФТИ НЕОДНОРОДНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ТЮМЕНСКОЙ СВИТЫ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ООО «ЛУКОЙЛ-ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ»)

Грачев Сергей Иванович<sup>1</sup>,  
grachevsi@tyuiu.ru

Юдчиц Виталий Викторович<sup>2</sup>,  
YudchitsVV@tmn.lukoil.com

Дручин Виталий Сергеевич<sup>2</sup>,  
DruchinVS@tmn.lukoil.com

Юнусов Радмир Руфович<sup>3</sup>,  
Radmir.Unusov@lukoil.com

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

<sup>2</sup> Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Республики, 41.

<sup>3</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»,  
Россия, 628486, г. Когалым, ул. Прибалтийская 20.

**Актуальность.** Из 26 промышленно-разрабатываемых месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» в Шаимском нефтегазоносном районе пласты средней юры продуктивны на 21 месторождении. В них сосредоточено 56 % извлекаемых запасов нефти. Залежи отложений средней юры имеют сложное геологическое строение и характеризуются неоднородностью по разрезу, не выдержаны по простиранию, имеют в целом низкие фильтрационно-емкостные свойства. Запасы нефти в отложениях пластов тюменской свиты отнесены к трудноизвлекаемым по стратиграфической принадлежности. Отбор нефти в них от начальных извлекаемых запасов по состоянию на 01.01.2021 г. составляет всего 8,6 %. Темп отбора от НИЗ 0,4 % в год. Исследование особенностей выработки коллекторов тюменской свиты является актуальной задачей.

**Цель:** выявить ключевые геолого-физические особенности разработки коллекторов тюменской свиты для поиска методов и технологий повышения эффективности их разработки.

**Объекты:** коллекторы тюменской свиты Шаимского района.

**Методы:** контент-анализ, анализ и обобщение имеющегося опыта разработки коллекторов тюменской свиты на примере трех месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

**Результаты.** Обобщены особенности геологического строения, выработки запасов пластов тюменской свиты и основные направления совершенствования технологии разработки. По результатам проведенного анализа выработки коллекторов тюменской свиты выявлены существенные различия в эффективности выработки запасов нефти. По результатам интерпретации гидродинамических исследований, проведенных на рассматриваемых месторождениях, на двух выявлены коллекторы с двойной средой, что может оказывать существенное влияние на достижение различной эффективности разработки указанных месторождений. Во многом низкая эффективность разработки объектов тюменской свиты обусловлена применяемыми системами разработки, запроектированными на недостаточно геологически изученных залежах. Важной прикладной задачей эксплуатации порово-трещиноватого коллектора является определение величины дренируемых запасов и возможность прогнозирования их выработки с применением характеристик вытеснения, соответствующих типу продуктивного пласта.

### Ключевые слова:

Тюменская свита, низкопродуктивные коллекторы, двойная среда, порово-трещиноватый коллектор, особенности разработки, гидродинамические исследования, заводнение.

Из 26 промышленно-разрабатываемых месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» в Шаимском нефтегазоносном районе пласты средней юры продуктивны на 21 месторождении. В них сосредоточено 56 % извлекаемых запасов нефти. Залежи отложений средней юры имеют сложное геологическое строение и характеризуются неоднородностью по разрезу, не выдержаны по простиранию, имеют в целом низкие фильтрационно-емкостные свойства [1]. Запасы нефти в отложениях пластов тюменской свиты отнесены к трудноизвлекаемым по стратиграфиче-

ской принадлежности. Отбор нефти в них от начальных извлекаемых запасов по состоянию на 01.01.2021 г. составляет всего 8,6 %. Темп отбора от НИЗ 0,4 % в год.

На месторождениях Шаимского нефтегазоносного района деятельности «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» промышленная нефтеносность установлена в доюрском складчатом фундаменте (кора выветривания – КВ), в среднеюрских (пласты Т, Ю<sub>2,9</sub>), верхнеюрских отложениях (пласт П, Ю<sub>0</sub>) и викуловской свите. Месторождения, описываемые в работе, многопластовые,



расположены в западной (месторождение 1), центральной (месторождение 2) и восточной частях (месторождение 3) района.

На месторождении 1 терригенные отложения тюменской свиты, представленные нефтенасыщенными коллекторами, имеют повсеместное распространение. Продуктивные отложения пласта П присутствуют лишь в пределах центральной части месторождения, а нефтенасыщенные коллекторы коры выветривания распространены в центральной и западной частях, имея мозаичный характер распространения.

На месторождении 2 продуктивными являются только три пласта тюменской свиты. Выше и ниже по разрезу нефтенасыщенных отложений не выявлено.

На месторождении 3 основные запасы нефти приурочены к отложениям викуловской свиты, в которой наибольшие перспективы связаны с областью врезанной долины. В центральной части месторождения открыты локальные залежи в нормальном разрезе баженовской свиты, в южной части продуктивна кора выветривания. Отложения тюменской свиты продуктивны на всей площади месторождения. Этаж нефтеносности тюменских отложений превышает 110 м.

Разработка изучаемых месторождений началась более 30 лет назад. Для вовлечения запасов нефти в

разработку в проектно-технологических документах рекомендуется применение плотных сеток скважин, избирательное заводнение и методы интенсификации добычи. На первом этапе были введены в разработку продуктивные пласты и участки, имеющие лучшие коллекторские свойства. Отложения тюменской свиты разбурены по рядной системе. Залежи эксплуатировались одиночными скважинами. Пробуренные до 2021 г. скважины сформировали на месторождениях очагово-избирательную систему заводнения с плотностью сетки 16 га/скв. Выявлено существенное различие в эффективности выработки запасов нефти на месторождениях (рис. 1).

Разбуривание месторождений не завершено, фонд скважин составляет от 22 % (месторождение 3) до 77 % (месторождение 1) от проектного фонда.

За период разработки месторождений выполнен большой объем гидродинамических исследований скважин (охват скважин исследованиями – более 50 %), в результате которых установлен диапазон значений коэффициента продуктивности 0,1–15,4 м<sup>3</sup>/сут·МПа (среднее значение 3,6 м<sup>3</sup>/сут·МПа). Повторные замеры показали, что в результате обводнения продуктивность снижается в три раза. Скин-фактор по пластам имеет отрицательное значение (в среднем 1,5).

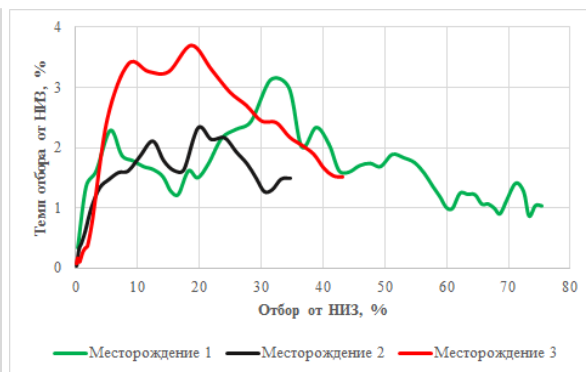
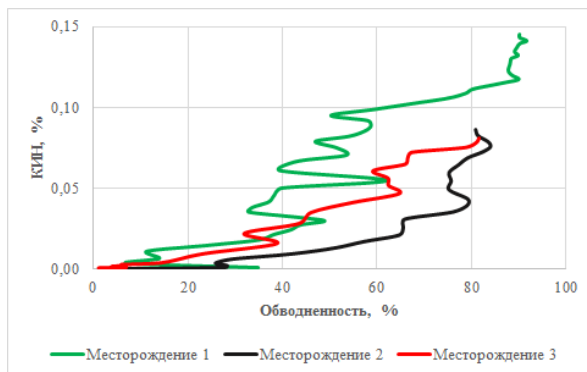


Рис. 1. Показатели разработки по трем месторождениям  
Fig. 1. Development parameters of three fields

В связи с низкой продуктивностью весь фонд добывающих скважин эксплуатируется механизированным способом, средний дебит жидкости для месторождения 1 ~51,7 т/сут, дебит нефти 5 т/сут (рис. 2, а); для месторождения 2 ~26,1 т/сут, дебит нефти 4,1 т/сут (рис. 3, а); для месторождения 3 ~26,6 т/сут, дебит нефти 3,7 т/сут (рис. 4, а). Часть добывающих скважин месторождений, имеющих низкие дебиты нефти и высокую обводненность, выведена в консервацию. Потенциал неработающего фонда скважин трех месторождений низкий – до 2 т/сут по нефти (рис. 2, б; 3, б; 4, б). Механизированный фонд скважин эксплуатируется при динамических уровнях 700–800 м и забойных давлениях, которые обычно превышают проектные значения на 2–3 МПа, коэффициент эксплуатации механизированного фонда скважин составляет 0,6–0,7.

В пласты с начала разработки ведется закачка воды, для изучаемых месторождений отбор жидкости

компенсирован на 90–130 %. В результате текущее пластовое давление в зонах отбора по площади месторождений среднем на 0,3–0,6 МПа выше первоначального.

В 2015–2020 гг. на месторождениях велось бурение уплотняющих скважин. Стоит отметить, что зачастую бурение велось на участках, где имелся длительный период эксплуатации и была вероятность влияния разработки. На анализируемых участках пробуренные до 2015 г. скважины работали с текущей обводненностью от 45 до 99 %, из них в 65 % скважин обводненность превышала 72 %. В таких сложных условиях только четыре из девятнадцати скважин уплотняющего фонда, пробуренные между рядами нагнетательных и добывающих скважин, вскрыли промытые нефтенасыщенные коллекторы и вступили в эксплуатацию с обводненностью более 45 % соответственно. Остальные 15 скважин дали практически безводную нефть.

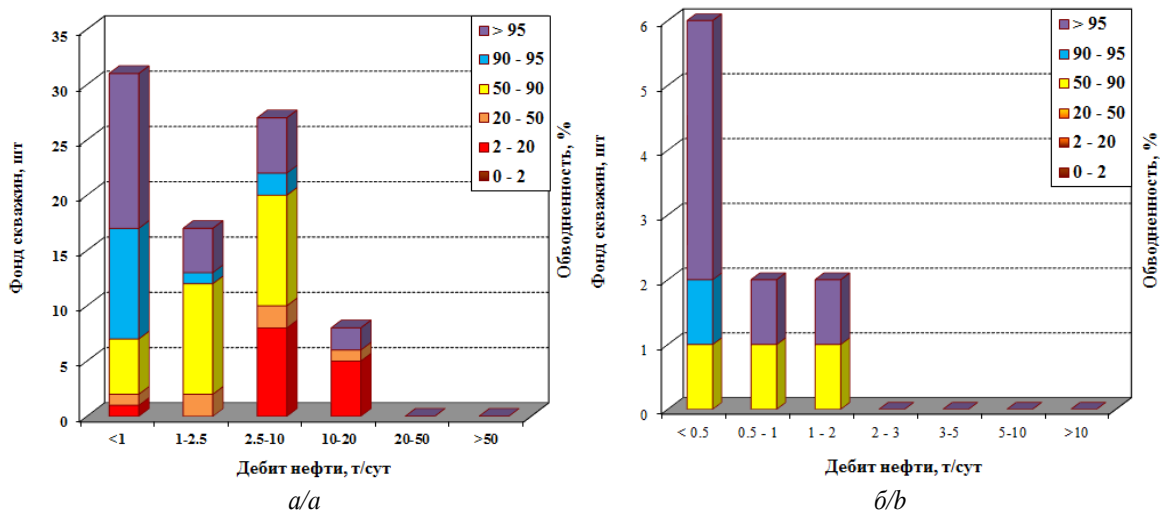


Рис. 2. Распределение (а) действующего фонда скважин и (б) неработающего фонда скважин, по дебитам нефти месторождения 1

Fig. 2. Distribution of (a) active wells and (b) idle wells, based on oil production rate of field no. 1

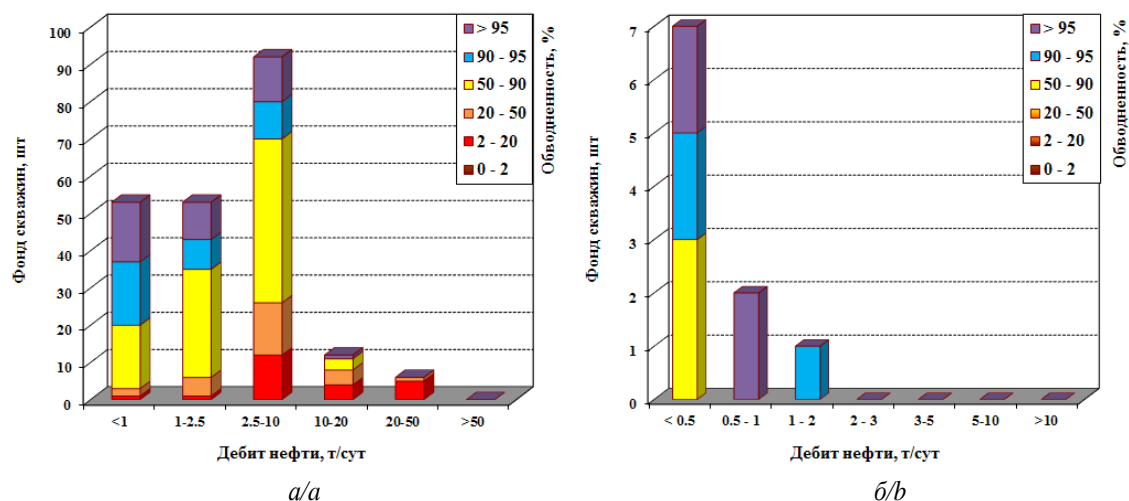


Рис. 3. Распределение (а) действующего фонда скважин и (б) неработающего фонда скважин, по дебитам нефти месторождения 2

Fig. 3. Distribution of (a) active wells and (b) idle wells, based on oil production rate of field no. 2

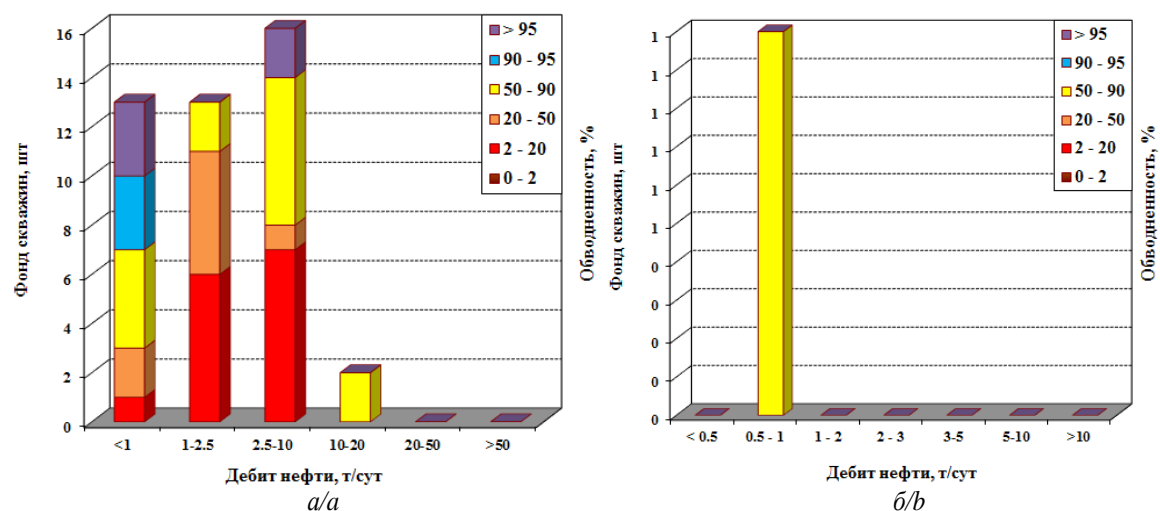


Рис. 4. Распределение (а) действующего фонда скважин и (б) неработающего фонда скважин, по дебитам нефти месторождения 3

Fig. 4. Distribution of (a) active wells and (b) idle wells, based on oil production rate of field no. 3

Средняя накопленная добыча нефти на одну уплотняющую скважину составила 16,7 тыс. т, изменяясь от 3,0 до 90,9 тыс. т. По результатам геолого-гидродинамического моделирования проведен анализ плотности остаточных запасов нефти в изучаемых отложениях и предложены дополнительные мероприятия по технологиям разработки месторождений:

- увеличение числа нагнетательных скважин за счет перевода низкодебитных добывающих скважин для организации избирательной закачки в интервалы пласта, не охваченные воздействием;
- уплотняющее бурение в выявленные на гидродинамической модели зоны с повышенной плотностью запасов;
- ввод из бездействия добывающих и нагнетательных скважин;
- повышение нефтеотдачи пластов за счет воздействия на пласт составами, обеспечивающими изоляцию промытых зон коллекторов.

Уплотняющие скважины на месторождениях 1 и 2 вскрыли часть нефтенасыщенного коллектора, отсутствующего в разрезах окружающих добывающих и нагнетательных скважин, тем самым подтвердив высокую степень прерывистости нефтенасыщенных коллекторов по простиранию.

Продуктивные отложения тюменской свиты на всех изучаемых месторождениях имеют достаточно большую общую толщину, которая изменяется от 0 м в зонах выклинивания до 180 м в наиболее погруженных зонах и разделяется глинисто-алевритистыми пе-

ремычками на 10–18 и более песчаных прослоев. В пределах границ горизонта выделяется от двух до семи примерно равных по толщине продуктивных пластов. Основные геологические особенности отложений тюменской свиты представлены в работах [2–4].

Развитие песчаных тел в разрезе носит сложный характер. Наряду с наличием множества изолированных песчаных линз, вскрытых единичными скважинами, по результатам специализированных работ по интерпретации сейсмических материалов в пределах месторождения 3 выявлены выдержанные по площади песчаные тела – «палеорусл», протяженность которых составляет от 1,6 до 5 км. Аналогичные зоны выявлены по скважинным данным на месторождениях 1 и 2.

Коллекторами являются песчаники нефтенасыщенные и алевриты плотные, глинистые. Песчаники в основном кварц-полевошпатовые, мелкозернистые, слоистые за счет включений углисто-глинистых разностей, слюдястые. Из глинистых минералов преобладает каолинит. В составе песчаников встречаются карбонатные минералы, однако в отличие от пласта II содержание карбонатов в тюменских песчаниках значительно ниже (в среднем 2–3 %).

Основная часть коллекторов (94 %), выделенных по результатам интерпретации геофизических исследований скважин (ГИС), сложена пропластками толщиной до 1,5 м, в том числе 35 % нефтенасыщенных пропластков имеют толщину до 0,6 м, 32 % – от 0,6 до 1,0 м (табл. 1).

**Таблица 1.** Статистическое распределение нефтенасыщенных прослоев отложений тюменской свиты по толщинам

**Table 1.** Statistical distribution of oil bearing layers in Tyumen geological interval based on their thickness

Месторождение/Field	Интервал толщин, м/Thickness, m								
	0–0,6	0,6–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	более 7/more than 7
1	48,3	28,7	17,2	3,3	1,6	0,5	0,2	0,2	0,1
2	36,7	30,8	26,1	5,0	0,9	0,2	0,1	0,1	–
3	26,1	39,7	27,8	5,7	0,4	0,3	0,1	–	–

Установленное наличие в разрезе пласта нефтенасыщенных пропластков толщиной до двух метров с плохой выдержанностью по простиранию подтверждает прерывистое строение, определяющее низкую величину песчаности пластов. Песчаность пластов тюменской свиты месторождения 1 равна 0,2, месторождения 2 – 0,18, месторождения 3 – 0,09. Расчлененность пласта T1 изменяется от 1 до 9, в среднем составляя 3,3. На месторождении 3 семь продук-

тивных пластов тюменской свиты были объединены в единый объект учета запасов, расчлененность равна 16, для отдельных пластов расчлененность изменяется от 2 до 4.

Значения коэффициента проницаемости варьируют от  $0,001 \cdot 10^{-3}$  до  $173 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Для рассматриваемых месторождений 75 % всех пропластков имеют проницаемость, не превышающую  $10 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> (табл. 2).

**Таблица 2.** Статистическое распределение нефтенасыщенных прослоев отложений тюменской свиты по проницаемости (по ГИС)

**Table 2.** Statistical distribution of oil bearing layers in Tyumen geological interval based on their permeability (from logging data)

Месторождение/Field	Интервал проницаемости, *10 <sup>-3</sup> мкм <sup>2</sup> /Permeability, 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>						
	менее 1 less than 1	1–2	2–10	10–20	20–50	50–100	более 100 more than 100
1	0,2	27,4	48,0	11,2	9,1	3,7	0,2
2	34,7	14,5	25,6	7,8	7,7	3,7	6,0
3	84,7	13,3	1,3	0,7	–	–	–

С другой стороны, на месторождениях 1 и 2 скважинами вскрыты участки с улучшенными ФЕС: 12,8 и 11,4 % пропластков имеют проницаемости более  $20 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$ . На месторождении 3 коллекторы с проницаемостью более  $10 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$  практически отсутствуют. В данном типе коллекторов фронтальное вытеснение нефти крайне затруднено, извлечение осуществляется преимущественно в режиме капиллярной пропитки в направлении естественных и техногенных трещин [5, 6].

Пористость пластов тюменской свиты колеблется от 11,5 до 21,3 % и в среднем составляет для месторождений 1 и 2 18 %, а для месторождения 3 – 12 %. Толщина глинистой перемычки (неколлектора), разделяющей пласты тюменской свиты, изменяется от 0,8 до 22,8 м, средняя толщина – 7,0 м.

Таким образом, выявлено, что отличительной особенностью пластов является наличие значительной доли пропластков коллектора толщиной менее 1 м (более 65 %). Среднее значение проницаемости коллектора не превышает  $10 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$ . Доля низкопроницаемого коллектора (менее  $2 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$ ) составляет по месторождениям: 1 – 27,6 %, 2 – 49,2 %, 3 – 98 %.

Анализ адаптации и настройки геологогидродинамической модели и промысловых данных показал, что коэффициенты действующих толщин (Кдт) по пачкам существенно отличаются и состав-

ляют от 0,44 до 0,84, что связано с различной песчаностью пачек; наличием множества изолированных песчаных линз, не попадающих в зоны влияния нагнетания; появлением в скважинах прослоев коллекторов, имеющих аномально высокие фильтрационные свойства (проницаемость). Сделан вывод, что значения Кдт от 0,44 до 0,55 в объектах разработки связаны с высокой изменчивостью песчаных тел (фациальными границами) и отсутствием связи проницаемых прослоев в зоне добычи и нагнетания. Для участков гидродинамической модели с выдержанной литологией, характеризующихся высокой связанностью коллекторов, в добывающих скважинах значения Кдт превышают 0,7.

Для рассматриваемых в работе месторождений классическое гидродинамическое взаимодействие коллекторов между нагнетательными и добывающими скважинами по данным ПГИС подтверждено в 35 % исследований. В 28 % исследований вода от нагнетательных скважин при совместной эксплуатации нескольких пластов поступает в выше- и нижележащие пласты, коллекторы которых имеют повышенную проницаемость. В 18 % случаев слабая гидродинамическая связь связана с зонами коллекторов с проницаемостью менее 2 мД и в 13 % – взаимодействия прослоев коллекторов нет, т. к. в ближайшем окружении от добывающих скважин нет скважин с закачкой.

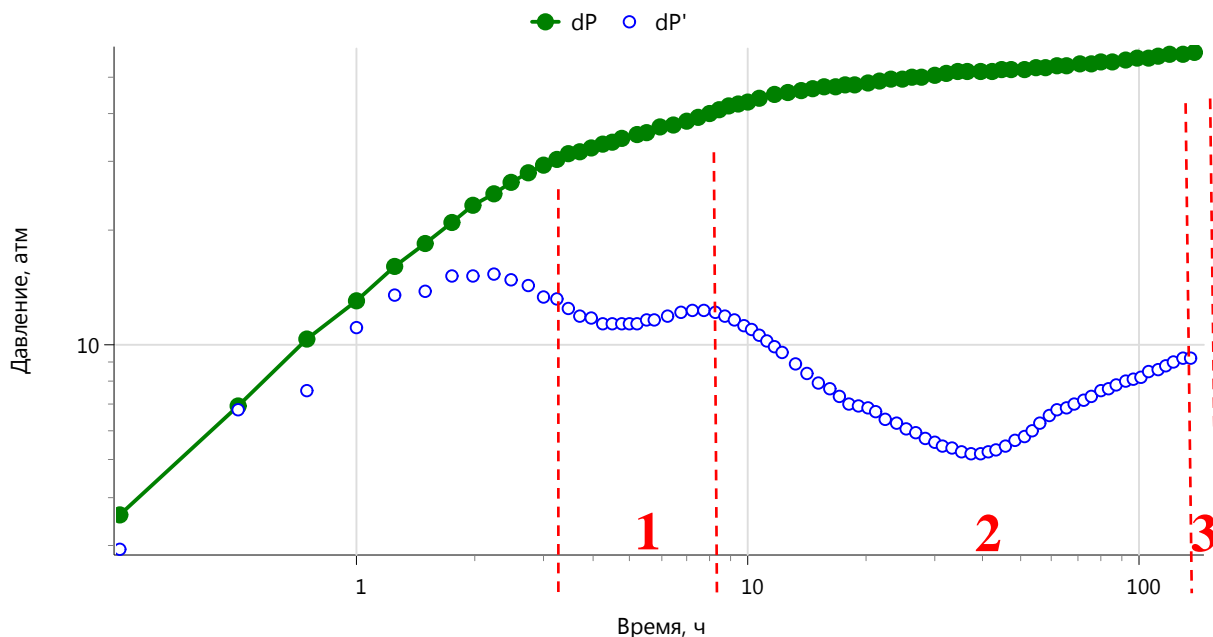


Рис. 5. Выделение коллектора с двойной проницаемостью по диагностическому графику КВД (месторождение 3)  
 Fig. 5. Identification of the reservoir with dual flow conditions based on pressure build-up graph (Field no. 3)

Проведено исследование важного фактора, который может влиять на достижения различной эффективности разработки указанных месторождений. При интерпретации результатов гидродинамических исследований (ГДИ) с применением ПО МГДИС выявлены коллекторы с двойной средой [7–9]. Распределение возмущенной части коллектора описывается моделью Баренблатта–Уоррена–Рута [10], при кото-

рой фильтрацию флюида можно разделить на три периода (рис. 5):

1. Из-за того, что трещина имеет более высокую проницаемость, на раннем этапе исследования приток флюида осуществляется только через систему трещин. Характерно, что данный режим проявляется в течение короткого времени и часто не идентифицируется на графиках из-за эффекта сжимаемости жидкости в скважине.

- Далее следует переходный режим (матрица–трещина), который характеризуется скачком производной вниз и соответствует перераспределению давления между матрицей и системой трещин.
- Вторая стабилизация производной соответствует радиальному притоку трещинно-матричной системы.

Проанализированы результаты более 250 исследований, и выявлено наличие двойной среды на 2 и 3 месторождениях (табл. 3).

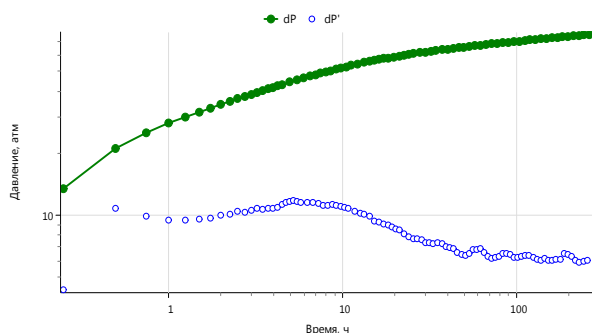
**Таблица 3.** Результаты гидродинамических исследований  
**Table 3.** Results of hydrodynamic tests

Месторождение Field	Количество исследований Number of tests	Выявлено влияние двойной среды Dual flow conditions identified	Двойная среда не выявлена Dual flow conditions not identified	Не кондиционные* Inconclusive*
1	81	0	60	21
2	86	11 (19 %)	46	29
3	112	14 (16 %)	75	23

\*недостаточное время замера/insufficient duration of test.

Характерные периоды фильтрации встречаются на 2 и 3 месторождениях и, соответственно, четко выделяются две зоны с различной проницаемостью (рис. 6–8). На рис. 8 видно отсутствие первого режима, что связано с низкой проницаемостью объекта и длительным эффектом влияния ствола в данной скважине.

Наличие двойной проницаемости подтверждено результатами лабораторных исследований ФЕС на керне. На месторождении 2 и 3 наблюдаются аномальные значения проницаемости образцов керна (~3–5 % определений), что указывает на наличие трещинной составляющей.

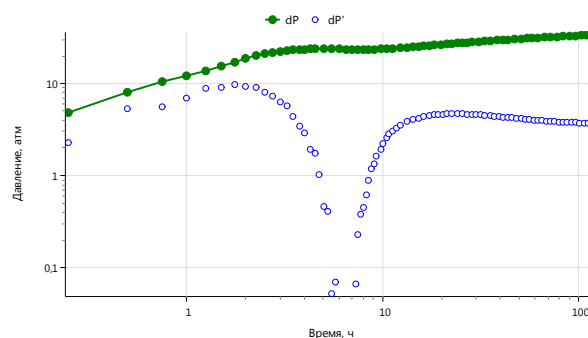


**Рис. 6.** Диагностический график КВД, характерный для скважин месторождения 1

**Fig. 6.** Typical pressure build-up graph for field no. 1 wells

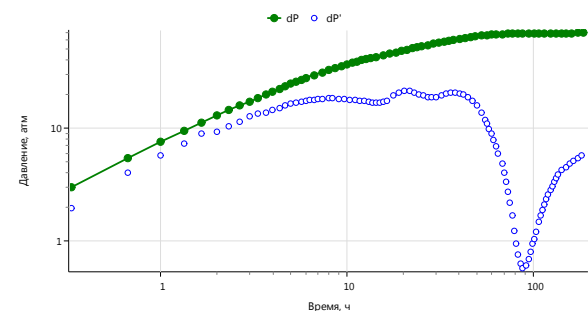
Впервые описание процессов фильтрации порово-трещиноватых коллекторов и пластов с двойной средой выполнено Г.И. Баренблаттом и Ю.П. Желтовым. Из отечественных авторов, работы которых посвящены трещиноватости нефтяных месторождений Запад-

ной Сибири, можно отметить Р.И. Медведского, К.С. Юсупова, В.А. Коротенко, А.А. Севастьянов, С.И. Грачева, среди зарубежных исследователей – П. Полларда, П. Рута, Дж. Уоррена, М.М. Каземи [11].



**Рис. 7.** Диагностический график КВД, характерный для коллектора с двойной средой на скважинах месторождения 2

**Fig. 7.** Typical pressure build-up graph for field no. 2 wells with dual flow conditions



**Рис. 8.** Диагностический график КВД, характерный для коллектора с двойной средой на скважинах месторождения 3

**Fig. 8.** Typical pressure build-up graph for field no. 3 wells with dual flow conditions

Очевидно, что наличие коллекторов с двойной средой на месторождениях 2 и 3 отрицательно влияет на эффективность технологии заводнения: низкое значение текущего коэффициента извлечения нефти (менее 10 %); высокая обводненность добываемой продукции (более 80 %). Это обусловлено тем, что лишь незначительная доля закачиваемой в пласт воды расходуется на вытеснение нефти, при том что основная доля нагнетаемой воды движется к добывающим скважинам по промьтым каналам [12–14]. При этом установлено, что чем выше давление нагнетания, тем выше вероятность образования каналов высокой проводимости [15, 16]. Результаты проведенного исследования соответствуют выводам в работе Р.И. Медведского и А.А. Севастьянова [17], что на месторождениях с трещиновато-поровыми коллекторами запланированная сетка скважин не позволяет выработать извлекаемые запасы в проектом объеме.

#### Заключение

По результатам анализа разработки залежей тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района необходимо отметить, что важной прикладной зада-

чей эксплуатации порово-трещиноватого коллектора является определение величины дренируемых запасов и возможность прогнозирования их выработки с применением соответствующих типу продуктивного пласта характеристик вытеснения [18]. Анализ выработки запасов выявил влияние высокопроводящей среды на эффективность технологии заводнения на месторождениях 2 и 3.

Наиболее эффективной для эксплуатации коллекторов с двойной средой видится щадящая площадная система воздействия, которая позволит избежать опережающего обводнения продукции скважин. При этом особое внимание необходимо уделить текущей компенсации отборов. Так, на начальном этапе разработки текущая компенсация может превышать отборы жидкости с последующим сокращением закачки до уровня отборов нефти [19].

Также очевидным выводом является низкая эффективность разработки объектов тюменской свиты, представленных сложнопостроенными залежами с низкими ФЕС, неравномерным распределением участков низкопродуктивных коллекторов и остатков палеорусловых тел с относительно высокопродуктивным коллектором. Равномерные сетки эксплуатационных скважин, запроектированные на недостаточно

геологически изученных залежах, приводят к низкой эффективности разработки. Поэтому большинство эксплуатационных скважин расположено в зонах низкой продуктивности. И никакие дополнительные методы повышения нефтеотдачи, включая выполнение ГРП и бурение ГС, не способны перевести разработку подобных трудноизвлекаемых запасов (тюменской свиты) в категорию «эффективных» и окупаемых [20].

Сюда же следует отнести распределение в разрезе и территории залежей и месторождений участков с наличием трещинного и порово-трещинного коллектора, местоположение которого становится более-менее известным только по результатам эксплуатационного бурения, динамики работы добывающих и нагнетательных скважин, ПГИ.

Перечисленные особенности сложного распределения относительно высокопродуктивных коллекторов и низкопродуктивных участков (занимающих основную часть площади залежей) в отложениях тюменской свиты требуют, в первую очередь, постановки детальных геолого-геофизических исследований при прогнозе и картировании их фильтрационно-емкостных характеристик на этапе подготовки к вводу в эксплуатацию и проектирования разработки таких месторождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трудноизвлекаемые запасы нефти Российской Федерации. Структура, состояние, перспективы освоения: монография / И.В. Шпуров, А.Д. Писарницкий, И.П. Пуртова, А.И. Вариченко. – Тюмень: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России), Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра), Западно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики, ЗапСибНИИГГ, 2012. – 256 с.
2. Бембель С.Р. Особенности геологического строения горизонта Ю<sub>2</sub> Западной Сибири на основе анализа сейсмических данных // Международный научно-исследовательский журнал «Norwegian Journal of development of the international science». – 2019. – № 36. – С. 10–13.
3. Совершенствование системы разработки Сырмояхского месторождения с использованием скважин сложной архитектуры / В.В. Юдчиц, Р.Е. Литовар, А.Ю. Сенцов, В.С. Дручин, Р.Р. Юнусов, М.В. Назаров // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – Т. 345. – № 9. – С. 87–92.
4. Шпуров И.В., Захаренко В.А., Фурсов А.Я. Дифференцированный анализ степени вовлечения и выработанности запасов юрских залежей в пределах Западно-Сибирской НПП // Недропользование XXI век. – 2015. – Т. 51. – № 1. – С. 12–19.
5. Pressure transient analysis for multi-wing fractured wells in dual-permeability hydrocarbon reservoirs / Qi-guo Liu, You-jie Xu, Xian Peng, Yicheng Liu, Shengzhi Qi // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 180. – P. 278–288.
6. Грачев С.И., Черняев А.В., Шпуров И.В. Совершенствование разработки коллекторов Юрских отложений // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2012. – № 4. – С. 53–57.
7. Особенности геологического строения и концептуальные геологические модели продуктивных пластов Кочевского месторождения, запасы которых оценены к категории трудноизвлекаемых / Н.Г. Аржиловская, Д.С. Баймухаметов, В.С. Дручин, П.В. Хлызов, М.Р. Мазитов // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли. Сборник докладов научно-практических конференций журнала «Нефтяное хозяйство». – М., 2019. – С. 108–117.
8. A new numerical well testing approach: application to characterization of complex fault structures / В. Pouladi, M. Sharifi, M.R. Akbari, S.M. HosseiniNasab // Petroleum. – 2019. – V. 5. – Iss. 3. – P. 295–302.
9. Study on characteristics of well-test type curves for composite reservoir with sealing faults / Qiguo Liu, Heng Lu, Longxin Li, Aiting Mu // Petroleum. – 2018. – V. 4. – Iss. 3. – P. 309–317.
10. Warren J.E., Root P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1963. – V. September. – P. 245–255.
11. Numerical simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs. / H. Kazemi, L.S. Merrill, K.L. Porterfield, P.R. Zeman // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1976. – V. December. – P. 317–326.
12. Grachev S.I., Korotenko V.A., Kushakova N.P. Study on influence of two-phase filtration transformation on formation of zones of undeveloped oil reserves // Journal of Mining Institute. – 2020. – V. 241. – P. 68–82.
13. Dual porosity and dual permeability modeling of horizontal well in naturally fractured reservoir / Nie Ren-Shi, Meng Ying-Feng, Jia Yong-Lu, Zhang Fu-Xiang, Yang Xiang-Tong, Niu Xin-Nian // Transport in Porous Media. – 2012. – V. 92. – P. 213–235.
14. Uleberg K., Kleppe J. Dual porosity, dual permeability formulation for fractured reservoir simulation // Trondheim RUTH Seminar. – Stavanger: Norwegian University of Science and Technology, 1996.
15. Афанасьев А.В., Горбунов А.Т., Шустеф И.Н. Заводнение нефтяных месторождений при высоких давлениях нагнетания. – М.: Изд-во «Недра», 1975. – 215 с.
16. Медведский Р.И. Концепция струйного вытеснения нефти водой // Вестник Удмуртского университета. – 2002. – № 9. – С. 121–129.
17. Медведский Р.И., Севастьянов А.А. Сопоставление методов прогнозирования извлечения запасов нефти в слоистых пластах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1998. – № 4. – С. 42–47.
18. Медведский Р.И., Севастьянов А.А. Использование обобщенной характеристики вытеснения при анализе разработки и прогнозировании выработки запасов // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО: Шестая научно-практическая конференция. – Ханты-Мансийск, 2003. – Т. 1. – С. 371–384.
19. Методическое обоснование повышения выработки запасов нефти месторождений, осложненных тектоническими нарушениями / А.В. Стенькин, Ю.А. Котенов, Ш.Х. Султанов, В.Г. Уметбаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 214–223.

20. Геологическая модель и обоснование оптимального размещения скважин на объектах тюменской свиты западной части Ханты-Мансийского автономного округа – Югры / С.Р. Бембель, Р.В. Авершин, Р.М. Бембель, В.И. Кислухин // Изве-

стия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 6. – С. 8–24.

*Поступила 13.10.2021 г.*

#### **Информация об авторах**

**Грачев С.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Тюменского индустриального университета.

**Юдчиц В.В.**, начальник отдела проектирования и мониторинга разработки месторождения им. В.Н. Виноградова Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени.

**Дручин В.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени по научной работе в области геологии.

**Юнусов Р.Р.**, начальник отдела контроля и анализа разработки месторождений нефти и газа ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

UDC 622.276.43

## SPECIFIC ASPECTS OF OIL RESERVES DEVELOPMENT FROM DISCONTINUOUS LOW-PRODUCTIVE RESERVOIRS OF TYUMEN GEOLOGICAL INTERVAL (ON THE EXAMPLE OF JSC LUKOIL-WEST SIBERIA FIELDS)

**Sergey I. Grachev**<sup>1</sup>,  
grachevsi@tyuiu.ru

**Vitaly V. Yudchits**<sup>2</sup>,  
YudchitsVV@tmn.lukoil.com

**Vitaly S. Druchin**<sup>2</sup>,  
DruchinVS@tmn.lukoil.com

**Radmir R. Yunusov**<sup>3</sup>,  
Radmir.Unusov@lukoil.com

<sup>1</sup> Tyumen Industrial University,  
70, Melnikayte street, Tyumen, 625000, Russia.

<sup>2</sup> «KogalymNIPIneft» (Tyumen), branch of LLC «LUKOIL-Engineering»,  
41, Respubliki street, Tyumen, 625000, Russia.

<sup>3</sup> LLC «LUKOIL-West Siberia»,  
20, Pribaltiyskaya street, Kogalym, 628486, Russia.

**Research relevance.** Middle Jurassic reservoirs are oil-bearing in 21 fields from total of 26 being produced by JSC LUKOIL-West Siberia in the Shaimsky oil-and-gas area, they contain 56 % of recoverable oil reserves. Middle Jurassic reservoirs have complex geological structure and are characterized by cross-sectional heterogeneity and lateral discontinuity, have low reservoir properties in general. Oil reserves in the reservoirs of Tyumen geological interval are classified as hard-to-recover based on the fields stratigraphy. Cumulative oil production from these reservoirs reached only 8,6 % from the total initial recoverable reserves as of 01.01.2021. Production rate is 0,4 % of the initial recoverable reserves per year. Research of the development of Tyumen geological interval reservoirs is a relevant exercise.

**The purpose** of the research is to reveal key geological and geophysical features of the development of Tyumen geological interval reservoirs in order to identify the best methods and technologies to increase efficiency of their development.

**Subject:** reservoirs of Tyumen geological interval in the Shaimsky area.

**Methods:** literature research, analysis of the available experience of the development of Tyumen geological interval reservoirs based on the example of three fields of JSC LUKOIL-West Siberia.

**Executive summary.** The paper analyzes and summarizes the specificities of geological structure, experience of the development of Tyumen geological interval reservoirs and the main methods of production enhancement and improvement of field development. Significant distinctions in the efficiency of field development are revealed based on the results of the carried-out analysis of geological and geophysical characteristics of the development of Tyumen geological interval reservoirs. According to the results of interpretation of the hydrodynamic researches conducted on considered fields, in two of them reservoirs with dual flow conditions (through both matrix and fractures) have been identified, which could have essential impact on the efficiency of development of these specified fields. Low performance of the development of Tyumen geological interval reservoirs is often caused by the use of uniform grid of the production wells, chosen due to insufficient knowledge of fields geological structure. The key issue is the evaluation of the recoverable reserves and the possibility to forecast production parameters using corresponding characteristics of oil drainage in accordance with the type of produced reservoir.

### Key words:

Tyumen geological interval, low-productive reservoirs, dual flow conditions, matrix and fractured reservoirs, features of development, hydrodynamic researches, water injection.

### REFERENCES

1. Shpurov I.V., Pisarnitskiy A.D., Purtova I.P., Varichenko A.I. *Trudnoizvlekaemye zapasy nefi Rossiyskoy Federatsii. Struktura, sostoyaniye, perspektivy osvoeniya: monografiya* [Hard-to-recover oil reserves of the Russian Federation. Structure, state, development prospects: monograph]. Tyumen, ZapSibNIIGG, 2012. 256 p.
2. Bembel S.R. Analysis of U2 horizon geological structure in Western Siberia based on seismic data. *Norwegian Journal of development of the international science*, 2019, no. 36, pp. 10–13. In Rus.
3. Yudchits V.V., Litovar R.E., Sentsov A.Yu., Druchin V.S., Yunusov R.R., Nazarov M.V. Improvement of system of development of the Symoryakhsy field with use of complex design wells. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2020, vol. 345, no. 9, pp. 87–92. In Rus.
4. Shpurov I.V., Zakharenko V.A., Fursov A.Ya. Differentiated analysis of Jurassic oil reserves involvement degree and its depletion within West Siberian basin. *Nedropolzovanie XXI vek*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 12–19. In Rus.
5. Qi-guo Liu, You-jie Xu, Xian Peng, Yicheng Liu, Shengzhi Qi. Pressure transient analysis for multi-wing fractured wells in dual-permeability hydrocarbon reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 180, pp. 278–288.
6. Grachev S.I., Chernyaev A.V., Shpurov I.V. Improvement of Jurassic deposits development. *Izvestiya visshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 2012, no. 4, pp. 53–57. In Rus.
7. Arzhilovskaya N.G., Baymukhametov D.S., Druchin V.S., Khlyzov P.V., Mazitov M.R. Osobennosti geologicheskogo stroeniya i kontseptualnye geologicheskie modeli produktivnykh plastov Kochevskogo mestorozhdeniya, zapasy kotorykh otseneny k kategorii trudnoizvlekaemykh [Geological structure and concep-



- tual geological models of productive strata of Kochevskoye field with hard-to-recover oil reserves]. *Aktualnye problemy neftegazovoy otrasli. Sbornik dokladov nauchno-prakticheskikh konferentsiy zhurnala «Neftyanoe khozyaystvo»*. Moscow, 2019. pp. 108–117.
8. Pouladi B., Sharifi M., Akbari M.R., Hosseini Nasab S.M. A new numerical well testing approach: application to characterization of complex fault structures. *Petroleum*, 2019. vol. 5, Iss. 3, pp. 295–302.
  9. Qiguo Liu, Heng Lu, Longxin Li, Aiting Mu. Study on characteristics of welltest type curves for composite reservoir with sealing faults. *Petroleum*, 2018, vol. 4, Iss. 3, pp. 309–317.
  10. Warren J.E., Root P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1963, vol. September, pp. 245–255.
  11. Kazemi H., Merrill L.S., Porterfield K.L., Zeman P.R. Numerical Simulation of Water-Oil Flow in Naturally Fractured Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1976, vol. December, pp. 317–326.
  12. Grachev S.I., Korotenko V.A., Kushakova N.P. Study on influence of two-phase filtration transformation on formation of zones of undeveloped oil reserves. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 68–82.
  13. Nie Ren-Shi, Meng Ying-Feng, Jia, Yong-Lu, Zhang Fu-Xiang, Yang Xiang-Tong, Niu Xin-Nian. Dual porosity and dual permeability modeling of horizontal well in naturally fractured reservoir. *Transport in Porous Media*, 2012, vol. 92, pp. 213–235.
  14. Uleberg K., Kleppe J. Dual porosity, dual permeability formulation for fractured reservoir simulation. *Norwegian University of Science and Technology, Trondheim RUTH Seminar, Stavanger*, 1996.
  15. Afanasev A.V., Gorbunov A.T., Shustef I.N. *Zavodnenie neftyanykh mestorozhdeniy pri vysokikh davleniyakh nagnetaniya* [Waterflooding of oil fields at high injection pressures]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 215 p.
  16. Medvedskii R.I. Kontseptsiya struynogo vytesneniya nefii vodoy [Concept of oil displacement by water jet]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2002, no. 9, pp. 121–129.
  17. Medvedskii R.I., Sevastyanov A.A. Sopostavlenie metodov prognozirovaniya izvlecheniya zapasov nefii v sloistykh plastakh [Comparison of oil recovery prediction methods from interbedded formations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 1998, no. 4, pp. 42–47.
  18. Medvedskii R.I., Sevastyanov A.A. Ispolzovanie obobschennoy kharakteristiki vytesneniya pri analize razrabotki i prognozirovaniya vyrabotki zapasov [Analysis of development scheme and prediction of reserves recovery using generalized fluids displacement parameters]. *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO. Shestaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [How to unlock oil & gas potential of Khanty-Mansiyskiy region. 6<sup>th</sup> scientific-engineering conference]. Khanty-Mansiysk, 2003. pp. 371–384.
  19. Stenkin A.V., Kotenov Yu.A., Sultanov S.K., Umetbaev V.G. Methodical substantiation of increasing production of oil reserves on the fields complicated by tectonic disturbances. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 214–223. In Rus.
  20. Bembel S.R., Avershin R.V., Bembel R.M., Kisluhkhin V.I. Geological model and optimal well placement substantiation at the western part Tyumen suite layers of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 2020, no. 6, pp. 8–24. In Rus.

Received: 13 October 2021.

#### Information about the authors

**Sergey I. Grachev**, Dr. Sc., professor, head of Oil and Gas Fields Development Department, Tyumen Industrial University.

**Vitaly V. Yudchits**, head of V.N. Vinogradov Field Development Design and Monitoring Division, «KogalymNIPneft» (Tyumen), branch of LLC «LUKOIL-Engineering».

**Vitaly S. Druchin**, Cand. Sc., deputy director for Research in the field of Geology «KogalymNIPneft» (Tyumen), branch of LLC «LUKOIL-Engineering».

**Radmir R. Yunusov**, head of Oil and Gas Fields Development Control and Analysis Division LLC «LUKOIL-West Siberia».

УДК 662.7; 662.641

## УГЛЕРОДИСТЫЙ ОСТАТОК ОТ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕШЛАМА КАК ОСНОВА ДЛЯ БИО-ТОПЛИВНОЙ КОМПОЗИЦИИ

Табакаев Роман Борисович<sup>1</sup>,  
TabakaevRB@tpu.ru

Ларионов Кирилл Борисович<sup>2</sup>,  
larryk@tpu.ru

Ибраева Канипа Талгатовна<sup>2,1</sup>,  
kti1@tpu.ru

Шаненков Иван Игоревич<sup>2</sup>,  
swordi@mail.ru

Заворин Александр Сергеевич<sup>2</sup>,  
zavorin@tpu.ru

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

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

**Актуальность** исследования обуславливается интересом к обеспечению тепловых затрат технологий переработки нефти за счет побочных продуктов (нефтешлама), а также необходимостью снижения вредных выбросов технологических процессов.

**Цель:** исследование возможности сжигания углеродного остатка, полученного при паровой газификации нефтешлама, в составе топливной композиции с добавлением торфа.

**Объект:** углеродистый остаток нефтешлама, полученный после паровой газификации нефтяного шлама при температуре 600 °С, и топливная композиция на его основе с добавлением торфа (25 мас. %).

**Методы.** Теплотехнические характеристики исследуемых образцов определены согласно ГОСТ Р 55661-2013, 33503-2015 и 55660-2013. Значения теплоты сгорания установлены при помощи калориметра АБК-1 (РЭТ, Россия), элементный состав – на анализаторе Vario Micro Cube (Elementar, Германия). Размер частиц УОН установлен при помощи растрового электронного микроскопа JSM-6000C (JEOL, Япония). Исследование процесса горения рассматриваемых образцов осуществлено с помощью дифференциального-термического анализатора STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany) и экспериментального стенда, оборудованного высокоскоростной видеокамерой FASTCAM CA4 5 (Photron, США). Характерные температуры плавкости золы и её состав определены согласно ГОСТ 2057-94 и ГОСТ 10538-87 соответственно.

**Результаты.** Углеродистый остаток нефтешлама имеет превышающую торф и сопоставимую с бурными углями теплоту сгорания и довольно низкую температуру воспламенения (220 °С), что обусловлено довольно высоким содержанием летучих веществ ( $V^{daf}=64,3\%$ ). Однако высокие значения зольности ( $A^d=60\%$ ) и содержания серы ( $S^{daf}=4,3\%$ ) указывают на необходимость утилизации большого количества золы и улавливания окислов серы SO<sub>x</sub>. Показано, что совместное сжигание углеродистого остатка и торфа (25 мас. %) позволило снизить количество образующегося зольного остатка. Помимо этого, при добавлении 25 мас. % суховесного торфа удалось снизить количество образующихся выбросов SO<sub>2</sub> более чем в 3 раза. Этот эффект обусловлен взаимодействием газовой фазы с минеральной частью торфа, а именно, с карбонатами кальция и магния.

### Ключевые слова:

Нефтешлам, углеродистый остаток, высокоминерализованный торф, топливная композиция, сжигание, выбросы оксидов серы.

### Введение

В настоящее время нефть является одним из наиболее востребованных видов энергоносителей в мире [1]. Её добыча, транспортировка, хранение и переработка сопровождаются образованием значительного количества нефтешламовых отходов [2–4], имеющих высокий класс опасности [3]. Состав нефтешламовых отходов зависит от своего технологического происхождения. Как правило, данный тип отхода представляет сложную смесь воды, нефтепродуктов, минеральных примесей и различных отложений (песок, глина, ил и т. п.) [5]. Исследования различных видов нефтешламовых отходов, полученных с маслоотделительных установок, резервуаров для

хранения топлива, трубопроводов, цистерн и их промывочных систем [6], показали, что основным отличием является различное содержание воды и механических примесей.

Одним из современных подходов переработки нефтешламовых отходов является их термическое преобразование методами пиролиза или газификации [2–4, 7] с получением полезных продуктов в виде жидких углеводородов, синтез-газа и углеродистого остатка. Перечисленные процессы относятся, как правило, к аллотермическому типу [8], по причине чего образующийся углеродистый остаток используют в качестве вторичного энергоресурса для компенсации энергетических затрат.

Однако использование углеродистых остатков, полученных при термической переработке нефтешламов, в качестве топлива технологически ограничено высоким содержанием серы и зольности. При сжигании серосодержащего топлива образуются сернистый ( $\text{SO}_2$ ) и серный ( $\text{SO}_3$ ) ангидриды, условно обозначаемые  $\text{SO}_x$  [9]. Оксиды серы и образующиеся при их контакте с парами воды кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) оказывают вредное воздействие на здоровье людей и живых организмов, являются причиной гибели растений, снижения урожайности сельскохозяйственных культур, закисления водоемов. Кроме того, оксиды серы являются причиной коррозии стальных конструкций [10, 11] и разрушения различных строительных материалов [12, 13]. С целью сокращения выбросов серы обычно используют следующие подходы: 1) предварительное снижение содержания серы в энергетическом топливе (замещение части серосодержащего топлива сырьем без серы, например, биомассой [14, 15], обессеривание [16], добавка к топливу карбонатов кальция или магния [17–19]); 2) внутрипочные методы (например, распыление внутри топочного устройства извести [20, 21]); 3) сероулавливающие установки для очистки дымовых газов (например, аммиачно-циклические, аммиачно-озонные, магнезитово-циклические и др. [22, 23]).

Наибольшее распространение в мире получила десульфуризация дымовых газов в сероулавливающих установках. В настоящее время известно более 80-ти модификаций способов удаления  $\text{SO}_2$  из дымовых газов, реализованных в США, Японии, Германии, Австрии и других странах. Всего в мире оснащено сероочистными установками оборудование суммарной мощностью более 135 ГВт [24]. Однако этот вид снижения  $\text{SO}_x$  приводит к повышению стоимости строительства ТЭС на 25–30 % и на 5–15 % увеличивает себестоимость тарифов [25].

Перспективным направлением в настоящее время является снижение вредных выбросов за счет сжигания топливных композиций с добавлением биомассы. Исследования ряда авторов [26, 27] показывают эффективность совместного сжигания угля и древесных отходов, при котором наблюдалось снижение выбросов  $\text{SO}_x$  и  $\text{NO}_x$ . Положительный эффект снижения вредных выбросов достигнут при смешивании табачного стебля и высокосернистого угля [28], в результате чего авторы добились значительного снижения выбросов  $\text{SO}_2$ . При этом в качестве оптимальных условий смешивания предлагается вариант добавления до 20 % табачного стебля. В работе [29] представлены результаты положительного влияния совместного использования угольного шлама и биомассы (древесина и солома) в качестве топливной композиции: по мере увеличения доли биомассы в композиции эмиссия  $\text{SO}_2$  постепенно снижалась, достигнув своего минимального значения при 70 мас. %.

Механизм снижения количества вредных выбросов при сжигании топливных композиций до сих пор полностью не изучен. Это обусловлено как широким разбросом в органическом и минералогическом составах сжигаемых топлив (угля и биомассы), так и

различными условиями сжигания (пылевидное, слоевое, кипящий слой). Однако в ряде работ [30] авторы отмечают, что снижение вредных выбросов происходит за счет взаимодействия оксидов серы с минеральной частью биомассы, в результате которого в зольном остатке образуются соли серной и сернистой кислот. Эти процессы особенно интересны при рассмотрении топливных композиций с добавлением высокоминерализованных видов биомассы, например, торфа.

Торф – это органоминеральная масса, образовавшаяся в процессе перегнивания остатков болотных растений. Зольность торфа в зависимости от растительного-торфообразователей и его географического положения может находиться в широком диапазоне значений – от 4,4 до 25,0 % [31]. В некоторых странах Европейского союза торф играет довольно серьезную роль в топливно-энергетическом балансе: в Финляндии и Ирландии доля торфа составляет 5–7 %, Эстонии – 1,9 %, Белоруссии – 1,6 % и Швеции – 0,7 % [32, 33].

Однако на территории Российской Федерации торф в основном используется для нужд сельского хозяйства, хотя имеет колоссальный потенциал для энергетического применения в качестве топлива: наша страна является мировым лидером по величине его запасов (30,8 млрд т при условной влажности 40 %, или более 10,7 млрд т при пересчете на условное топливо). При этом около 60 % от российских запасов по технологическим факторам оценены как потенциально извлекаемые [34].

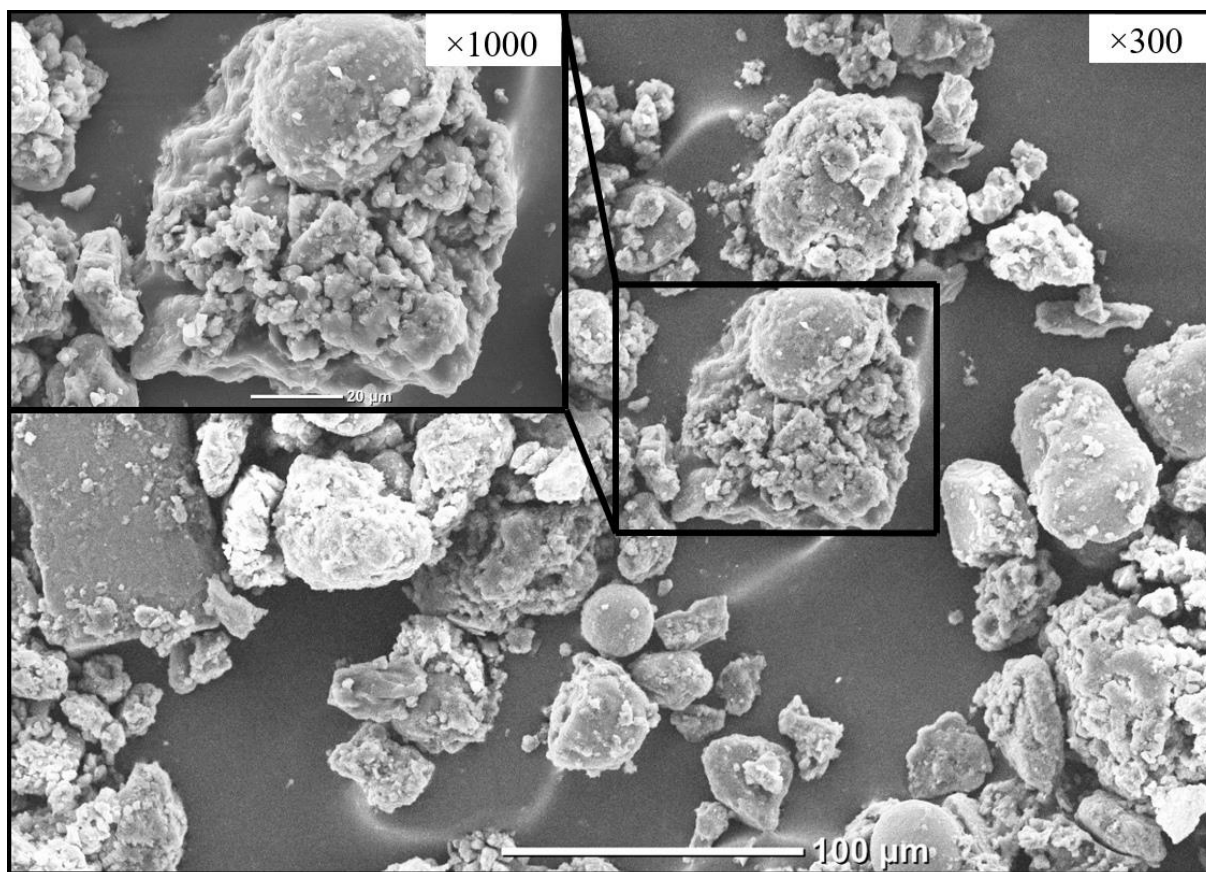
В связи с вышеописанным целью настоящей работы является исследование возможности сжигания углеродного остатка, полученного при паровой газификации нефтешлама, в составе топливной композиции с добавлением торфа.

#### Методика исследования

##### Объект исследования

В качестве объектов исследования рассмотрены: твердый углеродистый остаток (УОН), полученный после паровой газификации нефтяного шлама при температуре 600 °С, и топливная композиция (ТК) на его основе с добавлением торфа (25 мас. %). Размер частиц УОН, установленный при помощи растрового электронного микроскопа JSM-6000C (JEOL, Япония), не превышает 100 мкм (рис. 1).

В качестве добавки при изготовлении топливной композиции выбран торф месторождения Суховское (Россия, Томская область). Разведанные запасы месторождения, согласно [35], составляют более 19 млн т (при влажности торфа 40 %). Суховской торф относится к низинному типу и обладает следующими характеристиками:  $A^d=22,8$  %,  $W^a=9,9$  %,  $V^{daf}=74,8$  %,  $Q_i^r=11,8$  МДж/кг,  $S^{daf}=0,2$  % [36]. В ранее проведенных исследованиях [36, 37] показано, что зольный остаток торфа относится к тугоплавкому виду (начальная температура деформации золы составляет 1450 °С). Кроме того, по результатам рентгенофазового анализа торфа в минеральной части отмечено преобладание кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) и кварца ( $\text{SiO}_2$ ).



**Рис. 1.** РЭМ-изображение частиц УОН  
**Fig. 1.** REM-image of the carbon residue particles

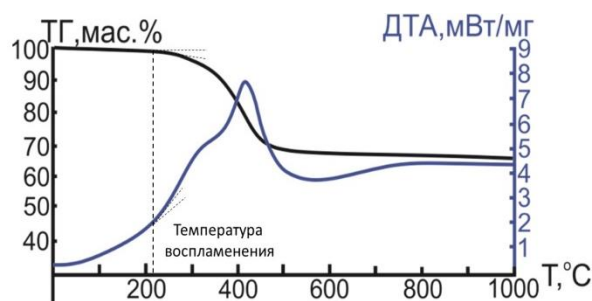
#### Теплотехнические характеристики

Теплотехнические характеристики УОН и ТК на его основе с добавлением торфа определены согласно ГОСТ Р 33503-2015, ГОСТ 55661-2013 и ГОСТ Р 55660-2013. Элементный состав органической части исследуемых образцов установлен при помощи анализатора Vario Micro Cube (Elementar, Германия), значение теплоты сгорания – на бомбовом калориметре АБК-1 (РЭТ, Россия).

#### Дифференциально-термический анализ

Исследование процесса окисления рассматриваемых образцов осуществлялось с помощью дифференциально-термического анализатора STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany). Анализ проводился при скорости нагрева 10 °С/мин в корундовом тигле до температуры 1000 °С. Образец массой 7–8 мг распределялся ровным слоем по дну тигля и помещался в поток окислительной среды (кислород). Скорость газового потока составляла 150 мл/мин. Все эксперименты проводились в условиях атмосферного давления.

Температуру воспламенения топлива определяли по кривым термогравиметрического (ТГ) и дифференциального термического (ДТА) анализов. При синхронном изменении сигналов ТГ и ДТА (отклонение прямой в сторону экзотермического эффекта) строили вспомогательные касательные прямые, по пересечению которых устанавливали значение соответствующей изменению температуры (рис. 2).



**Рис. 2.** Вспомогательные построения при определении температуры воспламенения по кривым термогравиметрического и дифференциального термического анализов

**Fig. 2.** Auxiliary constructions for determining the ignition temperature from the curves of thermogravimetric and differential thermal analysis

Кроме того, в настоящей работе выполнено качественное определение состава газообразных продуктов термического разложения (в частности  $\text{SO}_2$  ( $m/z=64$ )). Анализ проводился с помощью сопрягаемого квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 D Aeolos (Netzsch, Germany). Сравнение величин выбросов оксидов серы, образующихся при сжигании УО и ТК на его основе, осуществлялось путем сопоставления подынтегральной площади МС-профиля выделения  $\text{SO}_2$ .

Определение характерных температур плавкости золы

Характерные температуры плавкости золы определяли согласно ГОСТ 2057-94. Эксперименты проводили по следующей схеме: на первоначальном этапе осуществляли подготовку пробы – смешивали измельченную золу и 10 %-ый водный раствор декстрина; однородную смесь помещали в изготовленную емкость в форме трехгранной пирамиды для затвердевания; полученную пирамиду, размещенную на платиновой пластине, помещали в криптоловую печь с постепенным нагревом со скоростью 10–15 °С в минуту до температуры 1500 °С (рис. 3). В ходе эксперимента регистрировались температуры, при которых происходили деформационные изменения образца, соответствующие трем стадиям (начало деформации ( $t_A$ ), размягчение ( $t_B$ ) и переход в жидкоплавкое состояние ( $t_C$ )).

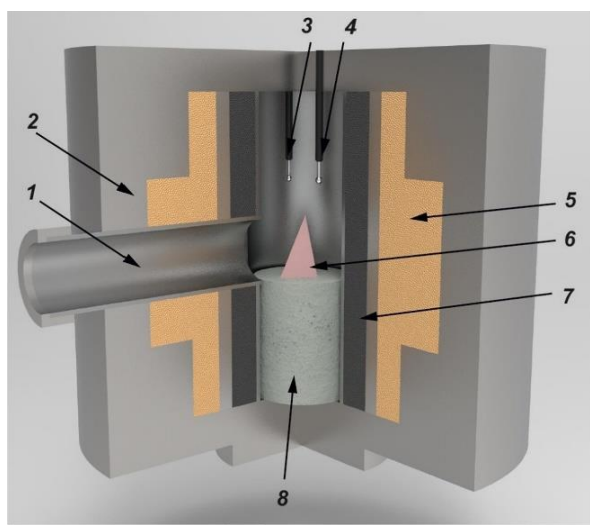


Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 – визирная трубка; 2 – корпус печи; 3 – измерительная термопара (ВР-1); 4 – контрольная термопара (ПП-1); 5 – шамотная крошка; 6 – пирамидка из золы; 7 – криптоловая засыпка; 8 – муфельная подставка

Fig. 3. Experimental setup: 1 – swirl tube with a lens; 2 – unit body; 3 – measuring thermocouple (WR-1); 4 – control thermocouple (PP-1); 5 – heat-insulating filling; 6 – pyramid of ash; 7 – cryptolite filling; 8 – muffle stand

Анализ химического состава золы

Химический состав золы определяли согласно ГОСТ 10538-87 «Топливо твердое. Методы определения химического состава золы». Используемые методы для определения компонентов золы ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,

$\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ) подробно описаны авторами в работе [36].

Экспериментальное сжигание

Исследование процесса горения проводилось с помощью экспериментального стенда, более подробное описание которого приведено авторами в предыдущей работе [38]. Температура греющей среды составляла 800 °С. Визуализация процесса горения выполнена с помощью высокоскоростной видеокамеры FASTCAM CA4 5 (Photron, США).

Результаты исследования

Характеристики углеродистого остатка нефтешлама

В табл. 1 представлены результаты определения теплотехнических характеристик УОН. Видно, что полученный при переработке продукт, несмотря на высокое значение зольности ( $A=60\%$ ), имеет превышающую торф (6,66–9,99 МДж/кг [39, 40]) и сопоставимую с бурными углями (6,38–19,80 МДж/кг [40]) теплоту сгорания ( $Q_i^r=14,2$  МДж/кг). Выход летучих при пересчете на сухую беззольную массу имеет довольно высокое для топлива значение, характерное для высокорекреакционных топлив, следствием чего является низкая температура начала воспламенения (220 °С), установленная при помощи ДТА (рис. 4).

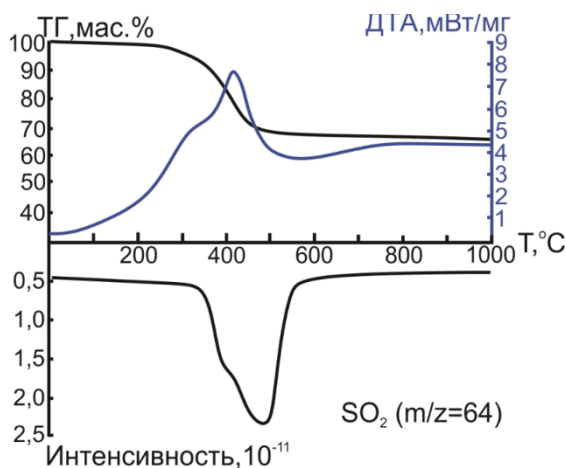


Рис. 4. Кривые термогравиметрического (ТГ) и дифференциального термического (ДТА) анализов при синхронной масс-спектропии газовых продуктов в процессе нагрева УОН в окислительной среде до температуры 1000 °С

Fig. 4. Curves of thermogravimetric (TG) and differential thermal (DTA) analysis during synchronous mass spectroscopy of gas products in the process of heating the carbonaceous residue in an oxidizing medium to a temperature of 1000 °С

Таблица 1. Теплотехнические характеристики и элементный состав углеродистого остатка нефтешлама

Table 1. Thermotechnical characteristics and elemental composition of carbon residue of oil sludge

Проба Sample	Влажность Moisture, $W^r$ , %	Зольность на сухую массу Ash on dry basis $A^d$ , %	Выход летучих веществ Yield of volatile substances $V^{daf}$ , %	Низшая теплота сгорания $Q_i^r$ , МДж/кг Low heating value $Q_i^r$ , MJ/kg	Элементный состав на сухую беззольную массу*, % Elemental composition per combustible mass*, %				
					$C^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$S^{daf}$	$O^{daf}$
Углеродистый остаток Carbon residue	0,6	60,0	64,3	14,2	63,2	5,3	0,8	4,3	26,4

Необходимо отметить довольно высокое содержание серы в пересчете на горючую массу топлива, равное  $S^{daf}=4,3\%$  (табл. 1), что приводит к образованию выбросов  $SO_2$  при сжигании (рис. 4).

При изучении плавкостных характеристик золы (рис. 5) установлено, что зольный остаток, полученный при сжигании УОН, относится к среднеплавкому типу ( $t_c > 1250^\circ C$ ). Однако низкие значения темпера-

туры начала деформации ( $t_A$ ) и величина отношения кислых компонентов к основным  $\Sigma K/\Sigma O$  (табл. 2) накладывают ограничения на температуру дымовых газов, образующихся при сжигании УОН, на выходе из топочной камеры – не более  $1050^\circ C$  [41]. Это условие необходимо учитывать при тепловом расчете котельного агрегата и конструировании топливосжигающего оборудования.

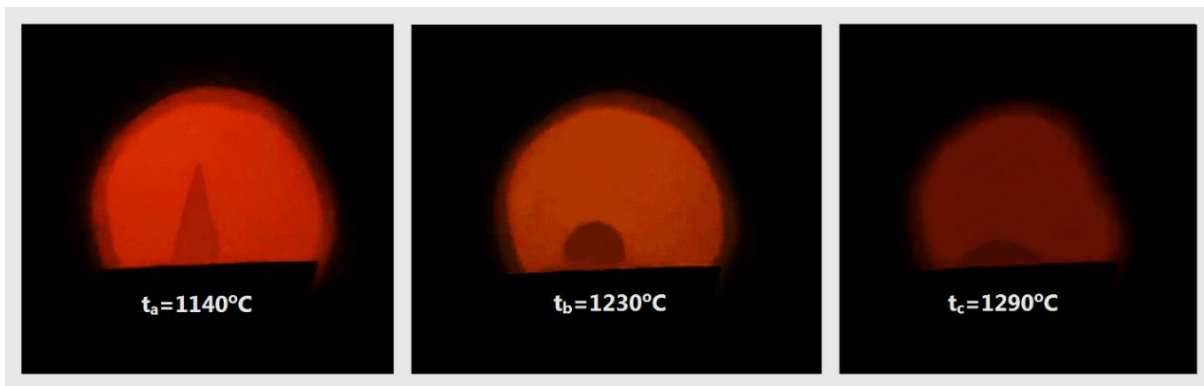


Рис. 5. Плавкостные характеристики зольного остатка, полученного при сжигании УОН

Fig. 5. Fusible characteristics of the ash residue obtained during CROS combustion

Таблица 2. Состав основных компонентов золы УОН

Table 2. Composition of the main components of CROS ash

Проба/Sample	Состав золы, %/Ash composition, %							$\Sigma K/\Sigma O$
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	
УОН/CROS	62,7	9,7	12,4	2,3	5,7	2,9	3,9	5,792

Сжигание нефтешлама и топливной композиции на его основе

На рис. 6 представлены кадры высокоскоростной видеосъемки, визуализирующие процесс горения исходного УОН и ТК на его основе при температуре греющей среды  $t_g=800^\circ C$ . Подготовленная ТК имеет следующие характеристики: зольность ( $A^d$ ) – 50,7 %, выход летучих веществ ( $V^{daf}$ ) – 66,9 %, низшая теплота сгорания ( $Q_i^d$ ) – 13,6 МДж/кг, содержание углерода ( $C^{daf}$ ) – 60,4 %, содержание водорода ( $H^{daf}$ ) – 5,6 %, содержание азота ( $N^{daf}$ ) – 1,5 %, содержание серы ( $S^{daf}$ ) – 3,3 %, содержание кислорода ( $O^{daf}$ ) – 29,2 %.

Процесс горения можно разделить на несколько стадий физико-химического преобразования, которые связаны с нагревом, испарением влаги, термодеструкцией и началом выделения летучих соединений, смешением горючих газов с окислительной средой и последующим окислением образующегося коксового остатка. При этом для обоих рассматриваемых образцов процесс горения протекает с образованием видимого пламени вблизи насыпки образца. Это связано с интенсивным выделением летучих веществ в виде горючих газофазных продуктов с поверхности образца. Так, вблизи насыпки формируется паровое облако с горючей смесью, в результате чего происходит ее газофазное зажигание. Следом за газофазным зажиганием наблюдается образование постепенно развивающегося пламени вокруг насыпки ( $\tau$  до 10 с). Отли-

чем процесса горения исследуемых образцов является время зажигания, продолжительность которого для образца с содержанием 25 мас. % торфа короче более чем в 2 раза.

На стадии окисления коксового остатка ( $\tau=10-20$  с) можно наблюдать изменение формы насыпки, что выражается в уменьшении ее объема ввиду плавления образующегося зольного остатка.

Как можно видеть по данным дифференциального термического анализа, совмещенного с масс-спектрометрией (рис. 7), при совместном сжигании торфа и углеродистого остатка количество образовавшихся оксидов серы значительно меньше: при сопоставлении интегральных площадей  $SO_2$  от сжигания ТК и УОН установлено, что количество образовавшихся оксидов снижается более чем в 3 раза. Это можно объяснить взаимодействием газовой фазы с минеральной частью торфа. Как показано в [36], основу минеральной части торфа составляет оксид кремния и карбонаты кальция и магния, что позволяет предположить следующий механизм взаимодействия:

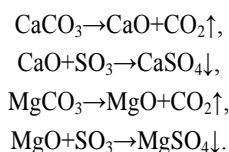


Таблица 3. Состав основных компонентов золы ТК

Table 3. Composition of the main components of FC ash

Проба/Sample	Состав золы/Ash composition, %							$\Sigma K/\Sigma O$
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	
Топливная композиция (углеродистый остаток 75 % + торф 25 %) Fuel composition (carbon residue 75 % + peat 25 %)	49,1	12,6	11,9	6,7	12,5	3,2	4,0	12,136

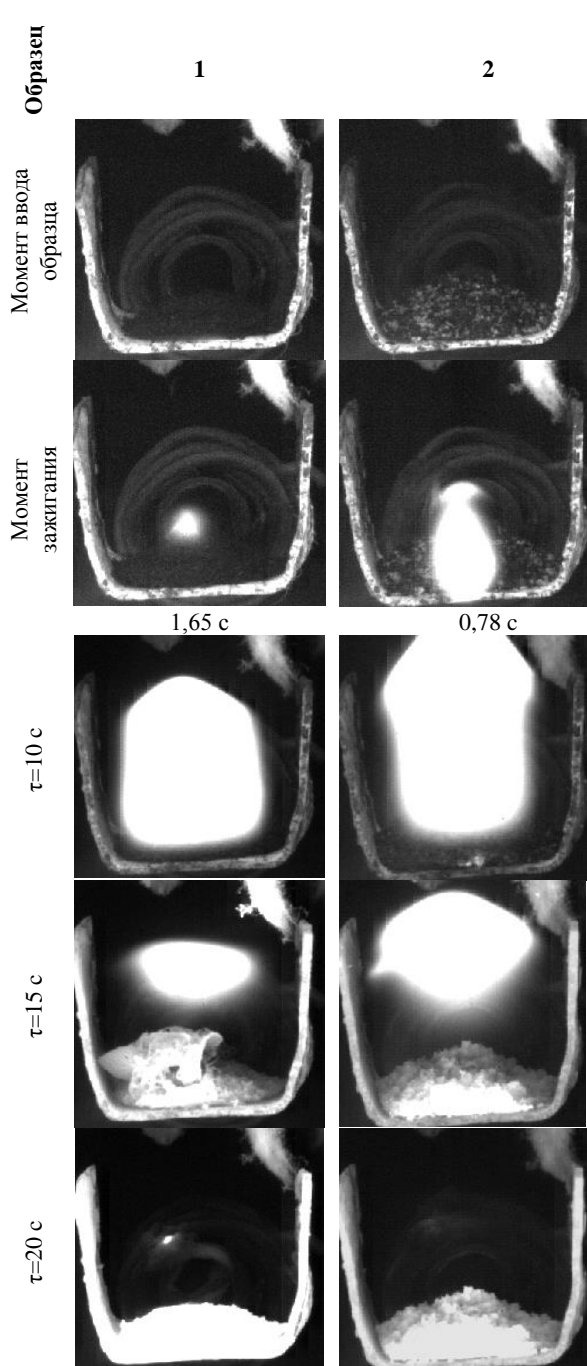


Рис. 6. Кадры начальной стадии процесса горения УОН и ТК на его основе при температуре греющей среды  $t_g=800$  °C: 1 – УОН, 2 – ТК (25 мас. % торфа)

Fig. 6. Frames of the initial stage of the combustion of CROS and FC based on it at the temperature of the heating medium  $t_g=800$  °C: 1 – CROS, 2 – FC (25 wt. % of peat)

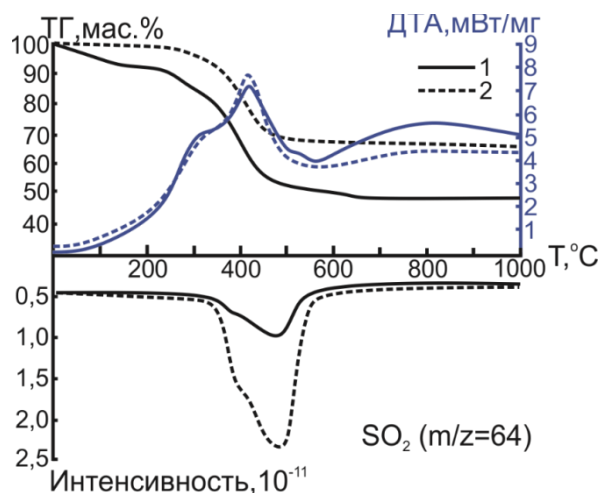


Рис. 7. Кривые термогравиметрического (ТГ) и дифференциального термического (ДТА) анализов при синхронной масс-спектропии газовых продуктов в процессе нагрева УОН и ТК на его основе в окислительной среде до температуры 1000 °C: 1 – ТК, 2 – УОН (для сравнения)

Fig. 7. Curves of thermogravimetric (TG) and differential thermal (DTA) analysis during synchronous mass spectroscopy of gaseous products in heating the carbonaceous residue and the fuel composition in an oxidizing environment (30–1000 °C): 1 – the fuel composition, 2 – the carbon residue (for comparison)

Подтверждением этому служит и состав золы, изученный после сжигания топливной композиции (табл. 3). При сравнении данных табл. 2, 3 видно, что в зольном остатке ТК содержание оксида серы увеличилось в 2,5 раза. Кроме того, произошло увеличение оксидов кальция и магния в 2,2 и 1,1 раза, соответственно, за счет минеральной части добавленного торфа.

#### Заключение

При изучении характеристик УОН, полученного при паровой газификации нефтешлама при температуре 600 °C, применительно к энергетическому использованию установлено, что данный продукт имеет превышающую торф и сопоставимую с бурными углями теплоту сгорания ( $Q_i^f=14,2$  МДж/кг). Температура воспламенения УОН составляет порядка 220 °C, что обусловлено довольно высоким содержанием летучих веществ ( $V^{daf}=64,3$  %). Однако высокие значения зольности ( $A^d=60$  %) и содержания серы ( $S^{da}=4,3$  %) указывают на необходимость утилизации большого количества золы и улавливания окислов серы SO<sub>x</sub>.

Рассмотрена возможность сжигания углеродистого остатка в составе топливной композиции при до-

бавлении высокоминерализованной биомассы на примере торфа Суховского месторождения ( $A=22,8\%$ ). Показано, что совместное сжигание углеродистого остатка и торфа (25 мас. %) позволило снизить количество образующегося зольного остатка до 50,7 % (рис. 7). Помимо этого, при добавлении 25 мас. % суховского торфа в процессе сжигания ТК удалось снизить количество образующихся выбросов  $SO_2$  более чем в 3 раза. Этот эффект обусловлен взаимодействием газовой фазы с минеральной частью торфа, а именно – с карбонатами кальция и магния. Таким образом, перспективным направлением развития дальнейших исследований представляется поиск

оптимального соотношения углеродистого остатка и торфа, обеспечивающего наименьшие выбросы оксидов серы при сжигании.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-90148). Аналитические измерения проведены в лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы в рамках государственного задания (тема: «Разработка безотходной технологии термической переработки биомассы в твердые и газообразные продукты для обеспечения энергетики и промышленности снижающей «углеродный след» продукцией»).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA Online Data Services. Renewables Information // IEA. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity.html> (дата обращения 11.08.2021).
2. Hazardous elements flow during pyrolysis of oily sludge / J. Li, F. Lin, L. Xiang, F. Zheng, L. Che, W. Tian, G. Chen // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – V. 409. – 124986.
3. Assessment of the energy recovery potential of oil sludge through gasification aiming electricity generation / Y.C. Santiago, A.M. González, O.J. Venturini, D.M.Y. Maya // Energy. – 2021. – V. 215. – 119210.
4. Experimental study on kinetic characteristics of oil sludge gasification / Z. Chu, Z. Gong, Z. Wang, H. Zhang, J. Wu, Z. Wang, H. Wang // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. – 2021. – V. 16. – P. 1–11.
5. Mazlova E.A., Meshcheryakov S.V. Ecological characteristics of oil sludges // Chemistry and technology of fuels and oils. – 1999. – V. 35. – P. 49–53.
6. Zhuravskii G.I. Fuel from oil sludges // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – V. 92. – P. 940–947.
7. Zhou L., Jiang X., Liu J. Characteristics of oily sludge combustion in circulating fluidized beds // Journal of hazardous materials. – 2009. – V. 170. – P. 175–179.
8. Autothermal and allothermal pyrolysis in a continuous fixed bed reactor / M. Milhé, L. Van de Steene, M. Haube, J.M. Commandré, W.F. Fassinou, G. Flamant // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2013. – V. 103. – P. 102–111.
9. Разва А.С. Методы и технологии очистки дымовых газов от оксидов серы // Студопедия. 2010. URL: [http://studopedia.ru/5\\_16593\\_metodiochistki-dimovih-gazov-ot-oksidov-seri.html](http://studopedia.ru/5_16593_metodiochistki-dimovih-gazov-ot-oksidov-seri.html) (дата обращения 19.08.2021).
10. Ding Q., Tang X.F., Yang Z.G. Failure analysis on abnormal corrosion of economizer tubes in a waste heat boiler // Engineering Failure Analysis. – 2017. – V. 73. – P. 129–138.
11. Соловьев А.К., Михеев В.О., Пуликов П.С. Очистка дымовых газов от оксидов серы // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 3 (9). – С. 33–36.
12. Yeau K.Y., Kim E.K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag // Cement and Concrete Research. – 2005. – V. 35. – P. 1391–1399.
13. Голубых Н.Д., Жеребятъева Т.В., Корнеев А.Д. Биодеструкция гидросиликатов строительных материалов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2009. – № 3. – С. 54–60.
14. Lasek J.A., Kazalski K. Sulfur self-retention during cocombustion of fossil fuels with biomass // Energy & fuels. – 2014. – V. 28. – P. 2780–2785.
15. Гриценко А.В., Внукова Н.В., Позднякова Е.И. Совместное сжигание продуктов пиролиза шин и древесных пеллет // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 363–376.
16. Исследование и внедрение процессов газификации углей и биомассы с целью замещения природного газа / И.Н. Карп, Е.П. Марцевой, К.Е. Пьяных, Т.А. Антошук, К.К. Пьяных // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 4. – С. 3–13.
17. Study on the migration characteristics of sulfur and nitrogen during combustion of oil sludge with CaO additive / H. Zhang, Z. Gong, L. Liu, Z. Wang, X. Li // Energy & Fuels. – 2020. – V. 34. – P. 6124–6135.
18. Нейтрализация соединений серы при фильтрационном горении сернистых углей путем добавки твердых кальцийсодержащих материалов / В.М. Кислов, Ю.Ю. Цветкова, М.В. Цветков, Е.Н. Пилипенко, М.В. Салганская // Горение и плазмохимия. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 127–132.
19. Effects of CaO-MgCO<sub>3</sub> on the combustion behavior and emission properties of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> during semi-coke combustion / G.L. Wu, R.T. Guo, Y.Z. Liu, C.P. Duan, Y.F. Miao, J.W. Gu, W.G. Pan // Chemical Papers. – 2021. – V. 75. – P. 2495–2501.
20. Арбузов В.А., Исанова Б.Х., Белякова М.О., Задиранов А.Н. Очистка дымовых газов ТЭЦ от оксидов серы и азота // Литьё и металлургия. – 2009. – № 3. – С. 99–103.
21. Combustion properties and desulfurization of high sulfur containing indian and nepali coals using lime-based products / R.M. Singh, M. Kamide, T. Li, H. Kim // Environmental science & technology. – 2005. – V. 39. – P. 4265–4269.
22. Rikker Y.O., Kobylkin M.V., Batukhtin A.G. Improving the efficiency of flue gas desulphurization of TPS // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 552. – 012024.
23. Риккер Ю.О., Кобылкин М.В. Обзор современных технологий очистки дымовых газов ТЭС от оксидов серы // Энергетика в современном мире. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2017. – С. 92–96.
24. R Jamil, Ming L., Jamil I. Application and development trend of flue gas desulfurization (FGD) process: a review // International Journal of Innovation and Applied Studies. – 2013. – V. 4. – P. 286–297.
25. Калинина А.С., Романович Д.А., Тринченко А.А. Современное состояние проблемы сероочистки дымовых газов тепловых электрических станций // Труды СПбГТУ. – 2013. – № 515. – С. 45–50.
26. Narayanan K.V., Natarajan E. Experimental studies on cofiring of coal and biomass blends in India // Renewable Energy. – 2007. – V. 32. – P. 2548–2558.
27. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass / X. Ren, R. Sun, X. Meng, N. Vorobiev, M. Schiemann, Y.A. Levendis // Fuel. – 2017. – V. 188. – P. 310–323.
28. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses / K. Zhang, Y. Cao, W.P. Pan // Bioresource technology. – 2013. – V. 131. – P. 325–332.
29. Co-combustion of wheat straw and camphor wood with coal slime: thermal behaviour, kinetics, and gaseous pollutant emission characteristics / L. Xinjie, Z. Shihong, W. Xincheng, S. Jinai, Z. Xiong, W. Xianhua, C. Hanping // Energy. – 2021. – V. 234. – 121292.
30. 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.



31. Торфяная промышленность России и мира. Анализ состояния и перспективы развития / Г.Ю. Боярко, П.В. Бернатонис, В.К. Бернатонис // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2014. – № 6. – С. 56–61.
32. Raappanen T., Leinonen A., Hillebrand K. Fuel peat industry in EU. Summary report. – Jyväskylä: Technical Research Centre of Finland, 2006. – 235 p.
33. Life-cycle climate impacts of peat fuel: calculation methods and methodological challenges / J. Grönroos, J. Seppälä, S. Koskela, A. Kilpeläinen, P. Leskinen, A. Holma, J. Turunen, S. Lind, M. Maljanen, P.J. Martikainen. // The International journal of life cycle assessment. – 2013. – V. 18. – P. 567–576.
34. Предприятия топливообеспечения и потенциальные возобновляемые ресурсы местного топлива по регионам Российской Федерации // Федеральная служба государственной статистики (форма 1-П) с 2000 по 2009 гг.
35. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов, Л.С. Михантьева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. – 88 с.
36. The study of highly mineralized peat sedimentation products in terms of their use as an energy source / R. Tabakaev, K. Ibraeva, N. Yazykov, I. Shanenkov, Y. Dubinin, A. Zavorin // Fuel. – 2020. – V. 271. – 117593.
37. Исследование характеристик и минерального состава торфа Томской области применительно к энергетическому использованию / К.Т. Ибраева, Ю.О. Манаев, Р.Б. Табакаев, Н.А. Языков, А.С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 191–200.
38. Combustion of bituminous coal and semicoke with copper salts / K.B. Larionov, I.V. Mishakov, K.V. Slyusarskiy, S.A. Tsibulskiy, R.B. Tabakaev, Y.I. Bauman, A.A. Gromov // Fuel Processing Technology. – 2021. – V. 213. – 106706.
39. Энергетическое топливо СССР. Ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий газ: справочник / В.С. Вдовченко, М.И. Мартынов, Н.В. Новицкий, Г.Д. Юшина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 183 с.
40. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
41. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов. – Барнаул: Изд-во АлтГТ, 2016. – 297 с.

Поступила 13.10.2021 г.

#### Информация об авторах

**Табакеев Р.Б.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Тюменского государственного университета.

**Ларионов К.Б.**, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ибраева К.Т.**, аспирант, инженер научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; инженер-исследователь Тюменского государственного университета.

**Шаненков И.И.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Заворин А.С.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой – руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова на правах кафедры Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета.

UDC 662.7; 662.641

## CARBON RESIDUAL FROM THE THERMAL PROCESSING OF OIL SLUDGE AS THE BASIS FOR A FUEL COMPOSITION

**Roman B. Tabakaev<sup>1</sup>,**  
TabakaevRB@tpu.ru

**Kirill B. Larionov<sup>2</sup>,**  
larryk@tpu.ru

**Kanipa T. Ibraeva<sup>2,1</sup>,**  
kti1@tpu.ru

**Ivan I. Shanenkov<sup>2</sup>,**  
shanenkovii@tpu.ru

**Alexander S. Zavorin<sup>2</sup>,**  
zavorin@tpu.ru

<sup>1</sup> University of Tyumen,  
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

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

**The relevance** of the research is caused by the interest in ensuring the thermal costs of oil refining technologies at the expense of by-products (oil sludge), as well as the need to reduce harmful emissions of technological processes.

**The main aim** is research of the possibility of burning the carbon residue obtained during steam gasification of oil sludge as part of a fuel composition with the addition of peat.

**Objects** of the research are carbon residue of oil sludge obtained after steam gasification of oil sludge at 600 °C, and a fuel composition based on it with the addition of peat (25 wt. %).

**Methods.** Thermotechnical characteristics of the studied samples are determined according to SS R 55661-2013, 33503-2015 and 55660-2013. Net calorific values of the peats were determined in the ABK-1 calorimeter (Russia), the elemental composition of the organic matter was determined using the analyzer Vario Micro Cube (Elementar, Germany). Particle size (CROS) was determined using a scanning electron microscope JSM-6000C (JEOL, Japan). The study of the combustion of the samples under consideration was carried out using the differential thermal analyzer STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany) and an experimental stand equipped with a high-speed video camera FASTCAM CA4 5 (Photron, USA). The characteristic melting temperatures of ash and its composition are determined according to the SS 2057-94 and the SS 10538-87, respectively.

**Results.** The carbon residue has a calorific value exceeding peat and comparable to brown coals and a rather low ignition temperature (220 °C), which is due to a rather high content of volatile substances ( $V^{daf}=64,3\%$ ). However, high values of ash content ( $A^d=60\%$ ) and sulfur content ( $S^{daf}=4,3\%$ ) indicate the need to dispose of a large amount of ash and capture sulfur oxides SO<sub>x</sub>. It is shown that the joint combustion of carbonaceous residue and peat (25 wt. %) allowed reducing the amount of ash residue formed. In addition, when adding 25 wt. % of sukhovskoy peat it was possible to reduce the amount of generated SO<sub>2</sub> emissions by more than 3 times. This effect is due to the gas phase interaction with peat mineral part, namely, with calcium and magnesium carbonates.

### Key words:

Oil sludge, carbon residue, highly mineralized peat, fuel composition, combustion, emissions of sulfur oxides.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-38-90148). Analytical measurements were carried out in the laboratory of resource-efficient technologies for thermal processing of biomass within the framework of a state assignment (topic: «Development of a waste-free technology for thermal processing of biomass into solid and gaseous products to provide energy and industry with products that reduce their carbon footprint»).

### REFERENCES

1. IEA Online Data Services. Renewables Information. Available at: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity.html> (accessed 11 August 2021).
2. Li J., Lin F., Xiang L., Zheng F., Che L., Tian W., Chen G. Hazardous elements flow during pyrolysis of oily sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 409, 124986.
3. Santiago Y.C., González A.M., Venturini O.J., Maya D.M.Y. Assessment of the energy recovery potential of oil sludge through gasification aiming electricity generation. *Energy*, 2021, vol. 215, 119210.
4. Chu Z., Gong Z., Wang Z., Zhang H., Wu J., Wang Z., Wang H. Experimental study on kinetic characteristics of oil sludge gasification. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2021, vol. 16, pp. 1–11.
5. Mazlova E.A., Meshcheryakov S.V. Ecological characteristics of oil sludges. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 1999, vol. 35, pp. 49–53.
6. Zhuravskii G.I. Fuel from oil sludges. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, pp. 940–947.
7. Zhou L., Jiang X., Liu J. Characteristics of oily sludge combustion in circulating fluidized beds. *Journal of hazardous materials*, 2009, vol. 170, pp. 175–179.
8. Milhé M., Van de Steene L., Haube M., Commandré J.M., Fassinou W.F., Flamant G. Autothermal and allothermal pyrolysis in a

- continuous fixed bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, vol. 103, pp. 102–111.
9. Razva A.S. Metody i tekhnologii ochistki dymovykh gazov ot oksidov sery [Methods and technologies for cleaning flue gases from sulfur oxides]. 2010. *Studopediya*. Available at: [http://studopedia.ru/5\\_16593\\_metodiouchistki-dimovih-gazov-ot-oksidov-seri.html](http://studopedia.ru/5_16593_metodiouchistki-dimovih-gazov-ot-oksidov-seri.html) (accessed 19 August 2021).
  10. Ding Q., Tang X.F., Yang Z.G. Failure analysis on abnormal corrosion of economizer tubes in a waste heat boiler. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 73, pp. 129–138.
  11. Solovyev A.K., Mikheev V.O., Pulikov P.S. Ochistka dymovykh gazov ot oksidov sery [Flue gas purification from sulfur oxides]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta*, 2014, no. 3 (9), pp. 33–36.
  12. Yeau K.Y., Kim E.K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35, pp. 1391–1399.
  13. Golubiykh N.D., Zherybateva T.V., Korneev A.D. Biodestruktsiya gidrosilikatov stroitelnykh materialov [Biodestruction of hydrosilicates of building materials]. *Nauchny vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2009, no. 3, pp. 54–60.
  14. Lasek J.A., Kazalski K. Sulfur self-retention during cocombustion of fossil fuels with biomass. *Energy & fuels*, 2014, vol. 28, pp. 2780–2785.
  15. Gritsenko A.B., Vnukova N.V., Pozdnyakova E.I. Sovmestnoe szhiganiye produktov piroliza shin i drevesnykh pellet [Cocombustion of pyrolysis products of tires and wood pellets]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG*, 2021, no. 4, pp. 363–376.
  16. Karp I.N., Martseyev E.P., Pyanyh K.E., Antoshchuk T.A., Pyanyh K.K. Research and implementation of coal and biomass gasification processes to replace natural gas. *Energy technologies and resource conservation*, 2014, no. 4, pp. 3–13. In Rus.
  17. Zhang H., Gong Z., Liu L., Wang Z., Li X. Study on the migration characteristics of sulfur and nitrogen during combustion of oil sludge with CaO additive. *Energy & Fuels*, 2020, vol. 34, pp. 6124–6135.
  18. Kislov V.M., Tsvetkova Yu.Yu., Tsvetkov M.V., Pilipenko E.N., Salganskaya M.V. Sulfur compounds neutralization at filtration combustion of sulfur coals by addition of calcium-based materials. *Combustion and plasma chemistry*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 127–132. In Rus.
  19. Wu G.L., Guo R.T., Liu Y.Z., Duan C.P., Miao Y.F., Gu J.W., Pan W.G. Effects of CaO-MgCO<sub>3</sub> on the combustion behavior and emission properties of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> during semi-coke combustion. *Chemical Papers*, 2021, vol. 75, pp. 2495–2501.
  20. Arbutov V.A., Isanova B.H., Belyakova M.O., Zadiranov A.N. Ochistka dymovykh gazov TETs ot oksidov sery i azota [Purification of flue gases of thermal power plants from sulfur and nitrogen oxides]. *Lityo i metallurgiya*, 2009, no. 3, pp. 99–103.
  21. Singh R.M., Kamide M., Li T., Kim H. Combustion properties and desulfurization of high sulfur containing indian and nepali coals using lime-based products. *Environmental science & technology*, 2005, vol. 39, pp. 4265–4269.
  22. Rikker Y.O., Kobylkin M.V., Batukhtin A.G. Improving the efficiency of flue gas desulfurization of TPS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 552, 012024.
  23. Rikker Yu.O., Kobylkin M.V. Obzor sovremennykh tekhnologii ochistki dymovykh gazov TES ot oksidov sery [Overview of modern technologies for cleaning flue gases of thermal power plants from sulfur oxides]. *Energetika v sovremennom mire* [Energy in the modern world]. Chita, Transbaikalian State University Publ., 2017. pp. 92–96.
  24. Jamil R., Ming L., Jamil I. Application and development trend of flue gas desulfurization (FGD) process: a review. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2013, vol. 4, pp. 286–297.
  25. Kalinina A.S., Romanovich D.A., Trichenko A.A. Sovremennoe sostoyaniye problemy seroouchistki dymovykh gazov teplovykh elektricheskikh stantsiy [The current state of the problem of desulfurization of flue gases of thermal power plants]. *Trudy SPbGTU*, 2013, no. 515, pp. 45–50.
  26. Narayanan K.V., Natarajan E. Experimental studies on cofiring of coal and biomass blends in India. *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, pp. 2548–2558.
  27. Ren X., Sun R., Meng X., Vorobiev N., Schiemann M., Levendis Y.A. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel*, 2017, vol. 188, pp. 310–323.
  28. Zhang K., Cao Y., Pan W.P. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses. *Bioresource technology*, 2013, vol. 131, pp. 325–332.
  29. Xinjie L., Shihong Z., Xincheng W., Jinai S., Xiong Z., Xianhua W., Hanping C. Co-combustion of wheat straw and camphor wood with coal slime: thermal behaviour, kinetics, and gaseous pollutant emission characteristics. *Energy*, 2021, vol. 234, 121292.
  30. 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 metaluminous coal and wood processing waste. *Fuel*, 2021, vol. 291, 120233.
  31. Boyarko G.Yu., Bernatonis P.V., Bernatonis V.K. Peat industry of Russia and the world. Analysis of the state and prospects of development. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2014, no. 6, pp. 56–61. In Rus.
  32. Paappanen T., Leinonen A., Hillebrand K. *Fuel peat industry in EU. Summary report*. Jyväskylä, Technical Research Centre of Finland, 2006. 235 p.
  33. Grönroos J., Seppälä J., Koskela S., Kilpeläinen A., Leskinen P., Holma A., Turunen J., Lind S., Maljanen M., Martikainen P.J. Life-cycle climate impacts of peat fuel: calculation methods and methodological challenges. *The International journal of life cycle assessment*, 2013, vol. 18, pp. 567–576.
  34. *Predpriyatiya toplivoobespecheniya i potentsialnye vozobnovly-aemye resursy mestnogo topliva po regionam Rossiyskoy Federatsii. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (forma 1-P) s 2000 po 2009 gg.* [Fuel supply enterprises and potential renewable resources of local fuel in the regions of the Russian Federation].
  35. Inisheva L.I., Arkhipov V.S., Maslov S.G., Mikhantseva L.S. *Torfyanые resursy Tomskoy oblasti i ikh ispolzovanie* [Peat resources of the Tomsk region and their use]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1995. 88 p.
  36. Tabakaev R., Ibraeva K., Yazykov N., Shanenkov I., Dubinin Y., Zavorin A. The study of highly mineralized peat sedimentation products in terms of their use as an energy source. *Fuel*, 2020, vol. 271, 117593.
  37. Ibraeva K.T., Manaev Yu.O., Tabakaev R.B., Yazykov N.A., Zavorin A.S. Study of the characteristics and mineral composition of peat of the Tomsk region in relation to energy use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 191–200. In Rus.
  38. Larionov K.B., Mishakov I.V., Slyusarskiy K.V., Tsibulskiy S.A., Tabakaev R.B., Bauman Y.I., Gromov A.A. Combustion of bituminous coal and semicoke with copper salts. *Fuel Processing Technology*, 2021, vol. 213, 106706.
  39. Vdovchenko V.S., Martynov M.I., Novitskiy N.V., Yushina G.D. *Energeticheskoe toplivo SSSR. Iskopaemye ugli, goryuchie slantsy, torf, mazut i goryuchiy gaz: spravochnik* [Energy fuel of the USSR. Fossil coals, oil shale, peat, fuel oil and combustible gas: reference]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 183 p.
  40. *Teplovoy raschet kotlov: normativnyy metod* [Thermal calculation of boilers: a normative method]. St-Petersburg, NPO TSKTI Publ., 1998. 256 p.
  41. Fursov I. D. *Konstruirovaniye i teplovoy raschet parovykh kotlov* [Design and thermal calculation of steam boilers]. Barnaul, AltSTU Publ., 2016. 297 p.

Received: 13 October 2021.

**Information about the authors**

**Roman B. Tabakaev**, Cand. Sc., senior researcher, University of Tyumen.

**Kirill B. Larionov**, Cand. Sc., associate professor National Research Tomsk Polytechnic University.

**Kanipa T. Ibraeva**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; research engineer, University of Tyumen.

**Ivan I. Shanenkov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander S. Zavorin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.313.33

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В МУЛЬТИФАЗНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ПРИ НЕСИММЕТРИИ РОТОРНЫХ ЦЕПЕЙ

Глазырин Александр Савельевич<sup>1,2</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Полищук Владимир Иосифович<sup>3</sup>,  
polischuk\_vi@mail.ru

Тимошкин Вадим Владимирович<sup>1</sup>,  
tim\_vv@mail.ru

Баннов Дмитрий Михайлович<sup>4</sup>,  
bannov.dm@samgtu.ru

Исаев Юсуп Ниязбекович<sup>1</sup>,  
isaev\_yusup@mail.ru

Антяскин Дмитрий Ильич<sup>5</sup>,  
antyaskin.dmitriy@gmail.com

Кладиев Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Филипас Александр Александрович<sup>1</sup>,  
filipas@tpu.ru

Ланграф Сергей Владимирович<sup>6</sup>,  
sergeylgrf@gmail.com

Котин Денис Алексеевич<sup>7</sup>,  
d.kotin@corp.nstu.ru

Ковалев Владимир Захарович<sup>2</sup>,  
vz\_kovalev@mail.ru

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

<sup>2</sup> Югорский государственный университет,  
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

<sup>3</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

<sup>4</sup> Самарский государственный технический университет,  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 224.

<sup>5</sup> ООО «Комплексные автоматизированные системы»,  
Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 240а.

<sup>6</sup> ООО «НПФ Мехатроника-Про»,  
Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 119Е.

<sup>7</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

**Актуальность** исследования обусловлена острой необходимостью в теоретическом обосновании и практической разработке селективных методов диагностирования сложных внутренних повреждений мощных высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, являющихся одним из главных элементов ответственных механизмов всех технологических процессов в топливно-энергетическом комплексе. Как правило, спецификой работы высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в топливно-энергетическом комплексе как на стадии добычи и транспортировки георесурсов, так и на стадии их переработки являются тяжелые условия пуска, особенно это выражено для ответственных механизмов тепловых электростанций (питательные насосы, мельницы, дробилки, дымососы, дутьевые вентиляторы и т. д.). Отказы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором на тепловых электростанциях приводят либо к отключению энергоблока, либо как минимум к снижению уровня выработки электроэнергии. При этом, несмотря на тяжелейшие и, как правило, необратимые последствия от такого повреждения – дефекты в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронных двигателей – защита от данного повреждения не существует, и является оно только в период капитального ремонта. Обрыв стержня ротора, вызывающий несимметрию роторных цепей, в начальной стадии носит скрытый характер и является толчком для развития более опасных аварийных режимов. Отсутствие апробированных технических средств диагностики данного вида повреждения, прежде всего, связано с недостаточной формализацией математического описания процессов в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором при возникновении дефектов в обмотке ротора.

**Объект:** высоковольтные асинхронные электродвигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором.

**Цель:** разработать математическую модель асинхронной машины с несимметрией роторных цепей, адекватно отображающую физические процессы в машине при возникновении повреждений в обмотке ротора.

**Методы и средства.** Для достижения поставленной цели применялись теоретические методы исследований. К ним относятся: теория электрических машин, численные методы. Имитационное моделирование производилось в среде MatLab, а математическая обработка данных – в пакете MathCad.

**Результаты.** Разработана  $n$ -фазная имитационная модель асинхронного двигателя, позволяющая исследовать обрыв стержня в беличьей клетке. Предложены аналитические выражения, которые описывают процессы в двигателе при неподвижном роторе.

**Ключевые слова:**

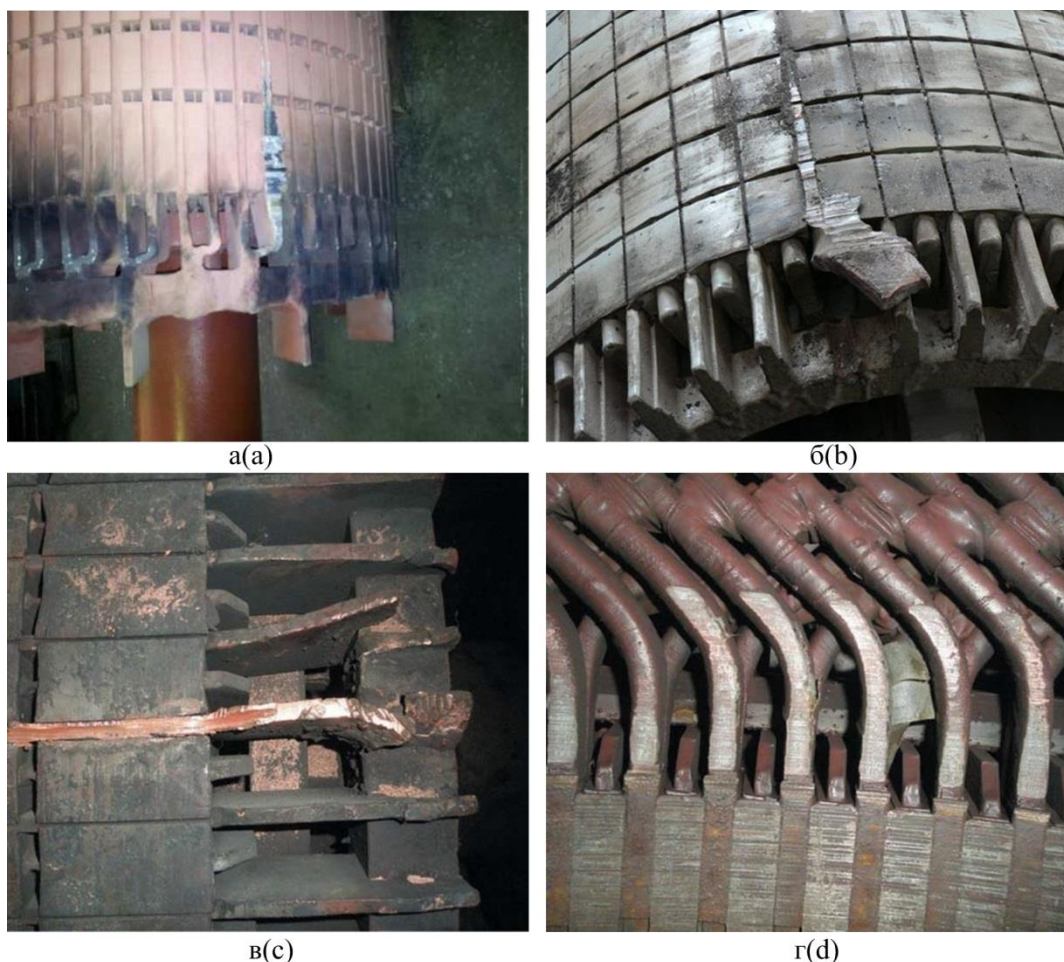
Асинхронный двигатель, математическая модель, «беличья клетка», обрыв стержня ротора, диагностика.

### Введение

Во всем мире в электроприводах всех ответственных механизмов собственных нужд (СН) тепловых электрических станций (ТЭС) используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДКР). В России ТЭС, работающие на угле и газе, вырабатывают более половины всей электроэнергии, и согласно стратегии развития электроэнергетики, их количество будет неуклонно расти. Если учесть, что совершенствование технологических процессов неизбежно увеличивает коэффициент использования АДКР ответственных механизмов СН ТЭС, то со временем неизбежно будет возрастать число отказов ответственных механизмов СН ТЭС по вине АДКР.

Высоковольтные АДКР на ТЭС, как правило, работают в тяжелых условиях пуска, и у них наблюдаются частые повреждения обмоток. Из числа всех возникающих у АДКР дефектов на обмотку ротора

приходится от 11 до 17 % в зависимости от типа машин [1, 2]. К самым распространенным повреждениям ротора относятся обрывы стержней «беличьей клетки», что составляет порядка 80 % от числа дефектов в роторной цепи [1]. Обрыв стержня обмотки ротора выявляют в основном при капитальном ремонте АДКР. В то же время из-за большой периодичности капитальных ремонтов такие дефекты своевременно не определяются, и АДКР может длительно работать с трещинами в стержнях, при этом потребляя дополнительную энергию и выделяя больше тепла в пусковых и в установившихся режимах [2]. Во время эксплуатации таких АДКР возрастает потребляемая им мощность и уровень вибрации, и вследствие воздействия на стержень центробежных сил он отгибается и задевает магнитопровод статора, что полностью выводит из строя двигатель и его крайне затруднительно восстановить.



**Рис. 1.** Последствия обрыва стержня ротора высоковольтного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: а) выход стержня из паза ротора асинхронного двигателя типа АДЧР-1600 с последующим коротким замыканием между фазами и на землю статорной обмотки; б) выход стержня из паза ротора асинхронного двигателя типа ДАЗО; в) выход стержня из паза ротора асинхронного двигателя типа АНЗ; г) повреждение активной части статора высоковольтного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором типа АНЗ

**Fig. 1.** Consequences of high voltage squirrel-cage rotor bar breakage: a) core exit from rotor slot of squirrel-cage induction motor ADCHR-1600 type with subsequent short circuit between phases and to ground of stator winding; b) core exit from rotor slot of squirrel-cage induction motor DAZO type; c) core exit from rotor slot of squirrel-cage induction motor ANZ type; d) damage of active part of stator of high voltage squirrel-cage induction motor ANZ type

На рис. 1 показаны последствия выхода из паза оторванного стержня, повлекшие за собой необходимость капитального ремонта лобовых частей статорной обмотки и магнитопровода. Как видно в первом случае, оторванный стержень нарушает изоляцию, замыкая токопроводящие части между собой и на корпус, чему свидетельствуют следы выделения большого количества тепловой энергии на внешней стороне ротора. На сегодняшний день защит, обладающих достаточной чувствительностью, способной определять дефект обмотки ротора АДКР, не существует. А методы диагностики такого рода неисправностей АДКР, основанные на термографическом, вибрационном, визуальном анализе [3–10], не дают достоверных и селективных диагностических признаков. При этом методы компенсации влияния электрической несимметрии на механический момент асинхронного двигателя комплексно не приносят желаемого эффекта в связи с неполной эффективностью и сложностью реализации [9]. Поэтому задача по разработке адекватной математической модели АДКР, позволяющей оценить разницу между бездефектным

состоянием ротора и поврежденным, всегда являлась актуальной.

#### Разработка $n$ -фазной математической модели асинхронного двигателя

Для исследования обрыва стержней в роторе необходима математическая модель АДКР, которая должна удовлетворять ряду требований: возможность задавать количество стержней в роторе, описывать адекватно процессы, возникающие в электрической машине, при нормальном и аварийном состоянии.

Рассмотрим описание электрической машины в  $n$ -фазной системе координат, где  $n$  соответствует общему количеству стержней в роторе. Процессы в роторе и статоре будем описывать в системе координат с одинаковой размерностью.

Асинхронный электродвигатель можно представить в виде эквивалентной многоконтурной схемы замещения, где каждый контур имеет свое активное сопротивление, индуктивности рассеяния и взаимные индуктивности. Изменяя соответствующее сопротивление  $R_R^{(1)}$  в контуре ротора, можно моделировать повреждение стержня (рис. 2).

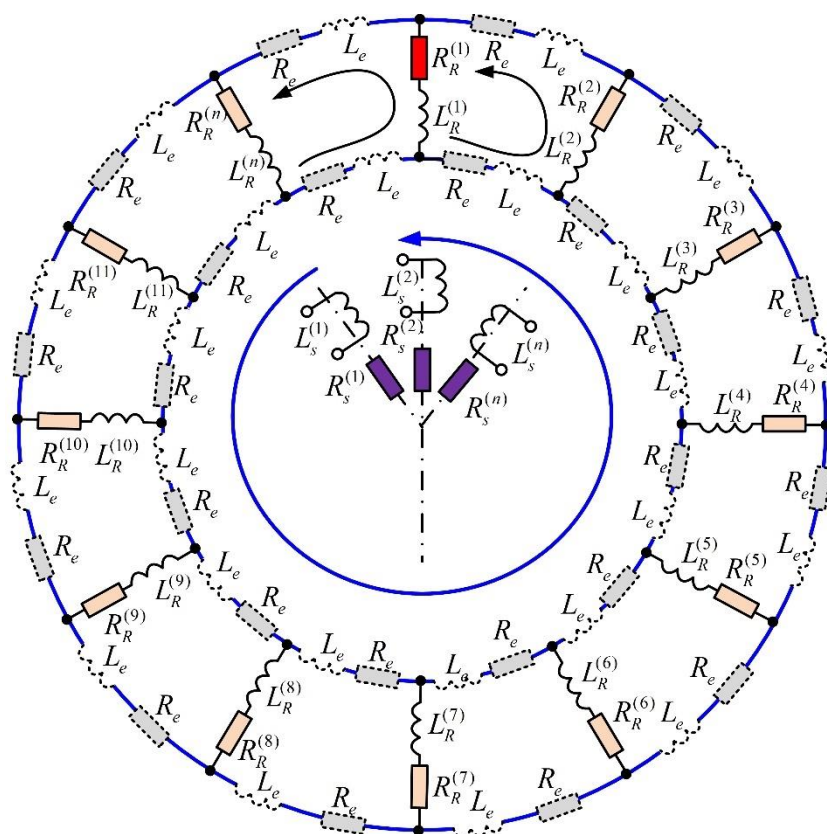


Рис. 2. Эквивалентная схема ротора и статора

Fig. 2. Equivalent rotor and stator circuit

При рассмотрении  $n$ -фазной машины было сделано допущение, которое позволяет упростить математическое описание и не учитывать комплексное сопротивление ( $R_e + j\omega L_e$ ) секторов короткозамкнутого кольца между соседними стержнями ротора (рис. 2).

Для построения  $n$ -фазной математической модели будем использовать общеизвестные принципы и выражения, которые применяются при моделировании асинхронных машин [11–15].

Система дифференциальных уравнений для  $n$ -фазной машины будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_s^{(1)}}{dt} = U^{(1)} - R_s \cdot i_s^{(1)}; \\ \dots \\ \frac{d\psi_s^{(n)}}{dt} = U^{(n)} - R_s \cdot i_s^{(n)}; \\ \frac{d\psi_r^{(1)}}{dt} = 0 - R_r \cdot i_r^{(1)}; \\ \dots \\ \frac{d\psi_r^{(n)}}{dt} = 0 - R_r \cdot i_r^{(n)}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_s$  – активное сопротивление статора;  $R_r$  – активное сопротивление ротора;  $i_s$  – ток статора;  $i_r$  – ток ротора;  $\psi_s$  – потокосцепление статора;  $\psi_r$  – потокосцепление ротора;  $U$  – входное напряжение для статорной обмотки.

Из представленной системы дифференциальных уравнений (1) видно, что  $n$  определяет количество стержней. С увеличением стержней в роторе порядок системы повышается, что усложняет расчеты.

Разрабатываемая математическая модель предназначена для исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой при обрыве стержней. Вектор входных напряжений формируется из составляющих статора и ротора, но так как двигатель имеет короткозамкнутую обмотку, то входные воздействия для роторной цепи будут всегда равны нулю.

Вектор входных напряжений будет формироваться следующим образом:

$$U_{BX} = [U^{(1)} U^{(2)} \dots U^{(n)} 0 \dots 0^{(n)}]^T. \quad (2)$$

Напряжения в многомерной системе координат описываются по следующему выражению:

$$U^{(n)}(t) = U_m \cdot \cos(\theta + \varphi_{сд}), \quad (3)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение,  $\theta = 2\pi ft = \omega t$ ;  $\varphi_{сд}$  – фазовый угол сдвига.

Зададимся напряжениями в трехфазной системе:

$$U_A(t) = \sqrt{2}U_A \sin(\omega \cdot t), \quad (4)$$

$$U_B(t) = \sqrt{2}U_B \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (5)$$

$$U_C(t) = \sqrt{2}U_C \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (6)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  – действующие значения напряжений.

Амплитудное значение напряжения для каждой фазы статора не зависит от системы координат:

$$U_m = \sqrt{U_A^2(t) + \frac{(U_B(t) - U_C(t))^2}{3}} = \sqrt{2} \cdot U,$$

где  $U$  – действующее значение напряжения для каждой фазы статора.

Угол  $\theta$  определим из уравнений напряжений в трехфазной системе координат:

$$\theta = \arctan\left(\frac{U_A(t)\sqrt{3}}{U_B(t) - U_C(t)}\right).$$

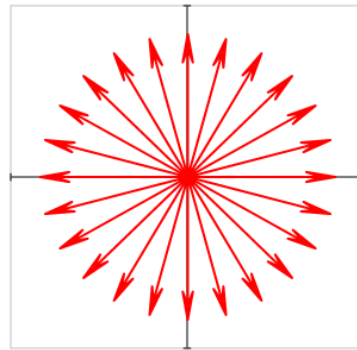


Рис. 3. Векторная диаграмма

Fig. 3. Vector diagram

Угол сдвига между составляющими напряжений в многомерной системе будет зависеть от числа стержней  $n$ , как показано на рис. 3:

$$\varphi_{сд} = \frac{2 \cdot \pi}{n}.$$

Далее, согласно закону Ампера, находим токи в статоре и роторе:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_s \\ \bar{\Psi}_r \end{bmatrix} = L_0 \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} = L_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_s \\ \bar{\Psi}_r \end{bmatrix},$$

где  $L_0 = \begin{bmatrix} L_{s0} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{r0} \end{bmatrix}$  – матрица индуктивностей;  $L_{s0}$  –

собственная матрица индуктивностей для статора;  $L_{r0}$  – собственная матрица индуктивностей для ротора;  $L_{sr}, L_{rs}$  – матрицы взаимных индуктивностей;

$\bar{\Psi}_s = \begin{bmatrix} \Psi_s^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_s^{(n)} \end{bmatrix}$  – вектор потокосцепления статора;

$\bar{\Psi}_r = \begin{bmatrix} \Psi_r^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_r^{(n)} \end{bmatrix}$  – вектор потокосцепления ротора;

$\bar{I}_s = \begin{bmatrix} I_s^{(1)} \\ \vdots \\ I_s^{(n)} \end{bmatrix}$  – вектор тока статора;  $\bar{I}_r = \begin{bmatrix} I_r^{(1)} \\ \vdots \\ I_r^{(n)} \end{bmatrix}$  – вектор

тока ротора.

Для определения собственных матриц индуктивностей статора и ротора используется вспомогательная матрица коэффициентов  $Corr(\varphi)$ , которая имеет зависимость от  $\varphi$ :

$$\begin{aligned} Corr(\varphi) = & \begin{bmatrix} 0 & \cos(\varphi) & \cos(2\varphi) & \dots & \cos(-a\varphi) \\ \cos(-\varphi) & 0 & \cos(\varphi) & \dots & \cos(-b\varphi) \\ \cos(-2\varphi) & \cos(-\varphi) & 0 & \dots & \cos(-c\varphi) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \cos(-a\varphi) & \cos(-b\varphi) & \cos(-c\varphi) & \dots & 0 \end{bmatrix}, \\ & a = (n-1); b = (n-2); c = (n-3). \end{aligned}$$

Матрица собственных индуктивностей статора:

$$L_{s0} = L_m \cdot Corr(\varphi) + \text{diag} [L_s^{(1)}, L_s^{(2)} \dots L_s^{(n)}],$$



где  $L_m$  – максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора.

Матрица собственных индуктивностей ротора:

$$L_{R0} = L_m \cdot \text{Corr}(\varphi) + \text{diag} [L_R^{(1)}, L_R^{(2)} \dots L_R^{(n)}].$$

Вычисление матриц  $L_{S0}$  и  $L_{R0}$  не требует значительных вычислительных мощностей, так как нет зависимости от угла поворота ротора.

Элементы  $L_{SR}$  и  $L_{RS}$  задаются также с помощью вспомогательной матрицы, которая имеет зависимость от  $\varphi$  и  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} \text{Cosr}(\gamma, \varphi) = \\ = \begin{bmatrix} \cos(b) & \cos(b-\varphi) & \dots & \cos(b-a\cdot\varphi) \\ \cos(b-\varphi) & \cos(b-\varphi-\varphi) & \dots & \cos(b-a)\cdot\varphi-\varphi \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \cos(b-a\varphi) & \cos(b-\varphi-a\varphi) & \dots & \cos(b-a\varphi-a\varphi) \end{bmatrix}, \\ a = (n-1); \quad b = \gamma_e, \end{aligned}$$

где  $\frac{d\gamma_e}{dt} = z_p \int \omega_r dt$  – угол поворота ротора.

Окончательные выражения для определения  $L_{SR}$  и  $L_{RS}$  имеют вид:

$$L_{RS} = L_m \cdot \text{Cosr}(\gamma, \varphi),$$

$$L_{SR} = L_m \cdot \text{Cosr}(\gamma, \varphi)^T.$$

После всех преобразований получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Psi_S^{(1)}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\Psi_S^{(n)}}{dt} \\ \frac{d\Psi_R^{(1)}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\Psi_R^{(n)}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^{(1)} \\ \vdots \\ U^{(n)} \\ 0 \\ \vdots \\ 0^{(n)} \end{bmatrix} - R \cdot L_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_S^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_S^{(n)} \\ \Psi_R^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_R^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $R = \begin{bmatrix} R_{S0} & 0 \\ 0 & R_{R0} \end{bmatrix}$  – главная матрица сопротивлений;  $R_{S0} = \text{diag} [R_S^{(1)}, R_S^{(2)} \dots R_S^{(n)}]$  – матрица сопротивлений статора;  $R_{R0} = \text{diag} [R_R^{(1)}, R_R^{(2)} \dots R_R^{(n)}]$  – матрица сопротивлений ротора.

Электромагнитный момент асинхронной машины определяется из токов статора и ротора:

$$M_{\text{дв}} = -z_p \cdot \bar{I}_S^T \cdot L_m \cdot \bar{I}_R \cdot \frac{3}{n}, \quad (8)$$

где  $z_p$  – число пар полюсов;

$$\begin{aligned} s(\varphi, b) = \\ = \begin{bmatrix} \sin(b) & \sin(b-\varphi) & \dots & \sin(b-a\varphi) \\ \sin(b-\varphi) & \sin(b-\varphi-\varphi) & \dots & \sin(b-a\varphi-\varphi) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sin(b-a\varphi) & \sin(b-\varphi-a\varphi) & \dots & \sin(b-a\varphi-a\varphi) \end{bmatrix} \\ a = (n-1); \quad b = \gamma_e \end{aligned}$$

– вспомогательная матрица;

$$L_n = \frac{d[L_{RS}]}{d\gamma_e} = -s(\varphi, \gamma_e) \cdot L_m.$$

Для обеспечения необходимой мощности на валу двигателя в  $n$ -фазной системе координат вводится коэффициент  $3/n$ , который позволяет независимо от размерности системы дифференциальных уравнений обеспечивать паспортный момент двигателя.

Математическое описание механической части асинхронной машины строится на базе одномассовой системы:

$$M_{\text{дв}} - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (9)$$

где  $J$  – момент инерции двигателя;  $M_C$  – момент нагрузки.

Имитация обрыва стержней в данном математическом описании реализуется с помощью введения добавочного сопротивления в матрицу  $R_{R0}$  для соответствующего стержня.

Для диагностики обрыва стержней в роторе используется модуль результирующего вектора тока статора (огibaющая токов статора):

$$I_{m1}(t) = \sqrt{I_S^{(1)}(t) + I_S^{(2)}(t) + I_S^{(3)}(t) + \dots + I_S^{(n)}(t)},$$

где  $I_S^{(1)}(t)$  – фазный ток статора.

Согласование огibaющей токов статора в  $n$ -фазной системе координат с трехфазной реализуется с помощью масштабирующего коэффициента  $k$ , который зависит от размерности системы:

$$k = \sqrt{\frac{3}{n}}. \quad (10)$$

Значение огibaющей токов статора в трехфазной системе можно найти по выражению:

$$I_m(t) = I_{m1}(t) \cdot k,$$

где  $I_{m1}(t)$  – огibaющая токов статора в многофазной системе.

#### Математическое описание трехфазной машины при неподвижном роторе

Асинхронные машины можно исследовать и при неподвижном роторе. При нулевой угловой скорости ротора математическое описание значительно упрощается и есть возможность получить аналитические выражения. Так как режим покоя для  $n$ -фазной модели является частным случаем, то полученные результаты можно использовать для подтверждения ее работоспособности.

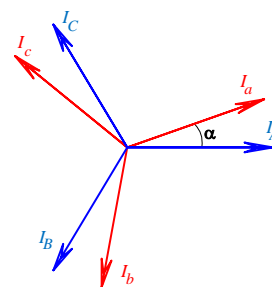


Рис. 4. Векторная диаграмма токов статора и ротора  
Fig. 4. Vector diagram of stator and rotor currents

Рассмотрим синтез системы уравнений, позволяющий получить в аналитическом виде описание токов для трехфазной машины при неподвижном роторе и с углами между обмотками статора и ротора (рис. 4):

$$\alpha = 0, \quad \cos(\alpha), \quad \cos(\alpha + 2\pi/3) = -1/2, \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) = -1/2.$$

Взаимные индуктивности при этом составляют:

$$M_{Aa} = M_{aA} = L_m \cos(\alpha) = L_m, \\ M_{Ab} = M_{bA} = L_m \cos(\alpha + 2\pi/3) = -1/2 L_m, \\ M_{Ac} = M_{cA} = L_m \cos(\alpha - 2\pi/3) = -1/2 L_m.$$

Учитываем влияние взаимной индуктивности обмоток статора и обмоток ротора и получаем систему дифференциальных уравнений для обмоток ротора:

$$\left\{ \begin{aligned} &L_R \frac{di_a}{dt} + i_a R_R - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + \\ &+ L_m \left( \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_C}{dt} \right) = 0; \\ &L_R \frac{di_b}{dt} + i_b R_R - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + \\ &+ L_m \left( \frac{di_B}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_C}{dt} \right) = 0; \\ &L_R \frac{di_c}{dt} + i_c R_R - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_A}{dt} \right) + \\ &+ L_m \left( \frac{di_C}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_A}{dt} \right) = 0 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

и уравнения для обмоток статора:

$$\left\{ \begin{aligned} &L_S \frac{di_A}{dt} + i_A R_S - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + \\ &+ L_m \left( \frac{di_a}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_c}{dt} \right) = U_A(t); \\ &L_S \frac{di_B}{dt} + i_B R_S - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + \\ &+ L_m \left( \frac{di_b}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_a}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_c}{dt} \right) = U_B(t); \\ &L_S \frac{di_C}{dt} + i_C R_S - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_A}{dt} \right) + \\ &+ L_m \left( \frac{di_c}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_a}{dt} \right) = U_C(t). \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Здесь индексы  $R$  и  $S$  означают принадлежность сопротивлений и индуктивностей к ротору и статору соответственно.

Разрешим системы уравнений (11) и (12) относительно производных и запишем в нормальной форме Коши:

$$\begin{pmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \\ di_A/dt \\ di_B/dt \\ di_C/dt \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \mathbf{B}$$

или в развернутом виде

$$\begin{pmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \\ di_A/dt \\ di_B/dt \\ di_C/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \mathbf{B},$$

где

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2L_S L_R + L_m (L_R + L_S - 4L_m)} \times \begin{pmatrix} L_m (U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_A \\ L_m (U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_B \\ L_m (U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_C \\ \left[ (L_m (2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S) U_A - \right. \\ \left. - (L_m^2 - L_m L_R) (U_A + U_B + U_C) \right] \\ L_S - L_m \\ \left[ (L_m (2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S) U_B - \right. \\ \left. - (L_m^2 - L_m L_R) (U_A + U_B + U_C) \right] \\ L_S - L_m \\ \left[ (L_m (2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S) U_C - \right. \\ \left. - (L_m^2 - L_m L_R) (U_A + U_B + U_C) \right] \\ L_S - L_m \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Такая запись (13) удобна тем, что если система векторов напряжений статора симметрична, то комбинации вида  $(U_A + U_B + U_C)$  будут равняться нулю. Здесь матрицы  $\mathbf{A}_{11}$ ,  $\mathbf{A}_{22}$ ,  $\mathbf{A}_{21}$  симметричные и имеют следующий вид:

$$\mathbf{A}_{11} = \frac{L_m R_R (L_S - L_m)}{(L_R - L_m) [2L_R L_S + (L_S + L_R - 4L_m) L_m]} \times \begin{pmatrix} c & -1 & -1 \\ -1 & c & -1 \\ -1 & -1 & c \end{pmatrix}, \\ \mathbf{A}_{22} = \frac{L_m R_S (L_R - L_m)}{(L_S - L_m) [2L_R L_S + (L_S + L_R - 4L_m) L_m]} \times \begin{pmatrix} d & -1 & -1 \\ -1 & d & -1 \\ -1 & -1 & d \end{pmatrix},$$

где

$$c = \frac{(2L_m R_R - L_R R_R + L_S R_R) L_m - 2L_R L_S R_R}{L_m R_R (L_S - L_m)}, \\ d = \frac{[(2L_m + L_R - L_S) L_m - 2L_R L_S] R_S}{L_m R_S (L_R - L_m)},$$

$$\mathbf{A}_{12} = \frac{L_m R_s}{2L_R L_s + (L_s + L_R - 4L_m)L_m} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_{21} = \frac{L_m R_R}{2L_R L_s - (L_R + L_s - 4L_m)L_m} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}.$$

Для вычисления корней решаем характеристическое уравнение:

$$|\mathbf{A} - \mathbf{I}p| = 0, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix}.$$

Здесь  $\mathbf{I}$  – единичная матрица шестого порядка;  $p$  – корень характеристического уравнения.

Получаем аналитическое решение для корней характеристического уравнения:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R_R}{L_R - L_m} \\ \frac{-R_s}{L_s - L_m} \\ \frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_4} \\ \frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_4} \\ \frac{S_1 + S_2 - S_3}{S_4} \\ \frac{S_1 + S_2 - S_3}{S_4} \end{pmatrix},$$

$$S_1 = 2(L_R R_s - L_s R_R); \quad S_2 = L_m (R_s + R_R);$$

$$\text{где } S_3 = \sqrt{\frac{(L_R R_s - L_s R_R)^2 + 4 + 4L_m (L_s R_R^2 + L_R R_s^2 - R_s R_R (L_R + L_s)) + L_m^2 (R_R^2 + R_s^2 + 34R_R R_s)}{}};$$

$$S_4 = 2(2L_R L_s - L_m (L_R + L_s - 4L_m)).$$

Приведем обратную матрицу системы, построенной на основе (9) и (10):

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} \\ \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} \\ \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} \\ \frac{-L_m}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_s}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} \\ \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_m}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_s}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} \\ \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_m}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_s}{R_s} \end{pmatrix}.$$

Правильность вычисления матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  можно проверить, умножив обратную матрицу  $\mathbf{A}^{-1}$  на вектор внешнего воздействия  $\mathbf{B}$ , предполагая, что внешние напряжения постоянные, например, равны единице. Легко увидеть, что при этом получаются установившиеся значения токов статора в каждой фазе как напряжения фаз, деленные на активные сопротивления статорной цепи, а токи в короткозамкнутом роторе равны нулю:

$$-\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} \\ \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} \\ \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} \\ \frac{-L_m}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_s}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} \\ \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_m}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_s}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} \\ \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_m}{R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{L_m}{2R_s} & \frac{-L_s}{R_s} \end{pmatrix} \times \frac{1}{2L_s L_R + L_m (L_R + L_s - 4L_m)} \times \begin{pmatrix} L_m (U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_A \\ L_m (U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_B \\ L_m (U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_C \\ \frac{[L_m (2L_R + L_m - L_s) - 2L_R L_s] U_A - [-(L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)]}{L_s - L_m} \\ \frac{[L_m (2L_R + L_m - L_s) - 2L_R L_s] U_B - [-(L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)]}{L_s - L_m} \\ \frac{[L_m (2L_R + L_m - L_s) - 2L_R L_s] U_C - [-(L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)]}{L_s - L_m} \end{pmatrix}.$$

Аналитическое выражение для переменного синусоидального тока получается громоздким, поэтому приведем его в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} i_{a \text{ уст}} \\ i_{b \text{ уст}} \\ i_{c \text{ уст}} \\ i_{A \text{ уст}} \\ i_{B \text{ уст}} \\ i_{C \text{ уст}} \end{pmatrix} = \text{Im} \left( (\mathbf{I}j\omega - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} e^{j\omega t} \right) = \begin{pmatrix} I_a \sin(\omega t + \varphi_a) \\ I_b \sin(\omega t + \varphi_b) \\ I_c \sin(\omega t + \varphi_c) \\ I_A \sin(\omega t + \varphi_A) \\ I_B \sin(\omega t + \varphi_B) \\ I_C \sin(\omega t + \varphi_C) \end{pmatrix}.$$

Амплитуда и фаза определяются решением системы уравнений:

$$\begin{pmatrix} I_a e^{j\varphi_a} \\ I_b e^{j\varphi_b} \\ I_c e^{j\varphi_c} \\ I_A e^{j\varphi_A} \\ I_B e^{j\varphi_B} \\ I_C e^{j\varphi_C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d & b & b & c & b & b \\ b & d & b & b & c & b \\ b & b & d & b & b & c \\ c & b & b & d & b & b \\ b & c & b & b & d & b \\ b & b & c & b & b & d \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_A \\ U_A a^2 \\ U_A a \end{pmatrix},$$

$$d = R_R + j\omega L_R; \quad b = -j\omega \frac{L_m}{2}; \quad c = j\omega L_m.$$

Здесь  $a$  – оператор поворота;

$$a = e^{j120^\circ} = -1/2 + j\sqrt{3}/2.$$

С помощью матрицы состояния  $\mathbf{A}$  и корней характеристического уравнения  $p$  представим решение в аналитическом виде:

$$\begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_a(0) \\ i_b(0) \\ i_c(0) \\ i_A(0) \\ i_B(0) \\ i_C(0) \end{pmatrix} e^{\mathbf{A}t} + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B}(\tau) d\tau. \quad (14)$$

Здесь  $e^{\mathbf{A}t}$  – экспоненциальная матрица, которая представляется в виде

$$e^{\mathbf{A}t} = \mathbf{I}\alpha_0(t) + \mathbf{A}\alpha_1(t) + \mathbf{A}^2\alpha_2(t) + \mathbf{A}^3\alpha_3(t) + \mathbf{A}^4\alpha_4(t) + \mathbf{A}^5\alpha_5(t).$$

Коэффициенты разложения  $\alpha_0(t), \alpha_1(t), \dots, \alpha_6(t)$  определяются корнями характеристического уравнения:

$$\alpha(t) = \mathbf{P}^{-1} \cdot \exp(pt) \Rightarrow \begin{pmatrix} \alpha_0(t) \\ \alpha_1(t) \\ \alpha_2(t) \\ \alpha_3(t) \\ \alpha_4(t) \\ \alpha_5(t) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & p_1 & p_1^2 & p_1^3 & p_1^4 & p_1^5 \\ 1 & p_2 & p_2^2 & p_2^3 & p_2^4 & p_2^5 \\ 1 & p_3 & p_3^2 & p_3^3 & p_3^4 & p_3^5 \\ 1 & p_4 & p_4^2 & p_4^3 & p_4^4 & p_4^5 \\ 1 & p_5 & p_5^2 & p_5^3 & p_5^4 & p_5^5 \\ 1 & p_6 & p_6^2 & p_6^3 & p_6^4 & p_6^5 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} e^{jp_1 t} \\ e^{jp_2 t} \\ e^{jp_3 t} \\ e^{jp_4 t} \\ e^{jp_5 t} \\ e^{jp_6 t} \end{pmatrix}.$$

Следует учесть, что, если размерность обратной матрицы выше трех, при наличии кратных корней, то она может быть сингулярной. В этом случае следует сдвинуть ее спектр на малую величину, например  $\lambda^{-10}$ :

$$\alpha(t) = (\mathbf{P} - \mathbf{I}\lambda)^{-1} \cdot \exp(pt).$$

### Имитационное моделирование асинхронной $n$ -фазной машины

Моделирование  $n$ -фазной асинхронной машины производилось в программной среде Matlab Simulink2021a при использовании стандартных библиотек. Для исследования был выбран асинхронный электродвигатель типа АДМ100S4У3 с параметрами, показанными в табл. 1.

Таблица 1. Заводские параметры асинхронного двигателя типа АДМ100S4У3

Table 1. Factory parameters of ADM100S4U3 type induction motor

$P_{из}$ , кВт $P_{ном}$ , kW	$I_{из}$ , А $I_{ном}$ , А	$n_{из}$ , об/мин $n_{ном}$ , rpm	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$U_{ф}$ , В $U_{L10G}$ , V	$J$ , кг·м <sup>2</sup> kg·m <sup>2</sup>
3	7,17	1410	82	0,82	220	0,0100

В табл. 2 представлены параметры схемы замещения АДМ100S4У3, которые были определены косвенным методом.

Таблица 2. Параметры схемы замещения асинхронного двигателя типа АДМ100S4У3

Table 2. Simulation parameters of ADM100S4U3 type induction motor

$R_1$	$R_2$	$L_1$	$L_2$	$L_m$
Ом/Ohm		Гн/H		
1,851	1,118	0,011	0,014	0,2138

При изменении числа фаз необходимо учитывать, что меняется максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора:

$$L_{m1} = L_m \cdot \frac{2}{n},$$

где  $n$  – число фаз статора и ротора.

Число стержней для исследуемого двигателя составляет  $n=28$ .

Схема имитационной модели в Matlab Simulink с основными элементами показана на рис. 5. Для обеспечения оптимальных расчетных показателей был выбран метод Рунге–Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом расчета 0,00002 с.

В блок 1 подаются трехфазные синусоидальные напряжения (4)–(6), которые сдвинуты на 120 градусов. Затем с помощью блока – 2 преобразуются мгновенные напряжения из трехфазной системы координат в многофазную по выражению (3) и формируется вектор входных воздействий (2). В блоке – 4 осуществляется расчет токов статора и ротора на основе системы дифференциальных уравнений (7), а в блоке – 5 момента двигателя с помощью соотношения (8). Блоки – 2, 4 и 5 построены на основе программных функций.

Далее на основе полученного момента двигателя определяется угловая скорость вала ротора (блок 6) по дифференциальному уравнению (9). Данные о скорости используются для определения угла, который необходим для вычисления взаимных индуктивностей в блоке – 4.

Задание повреждений в стержнях ротора реализуется путем увеличения сопротивления в блоке – 3.

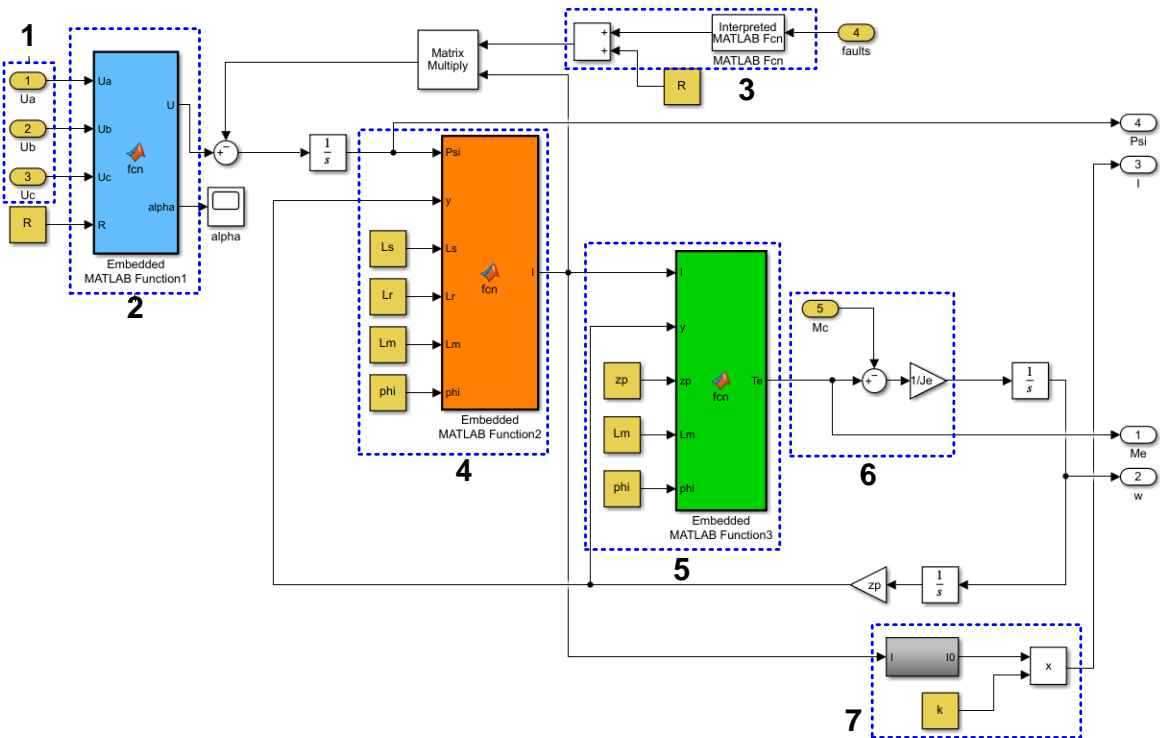


Рис. 5. Имитационная модель асинхронного двигателя в Matlab Simulink  
 Fig. 5. Simulation model of an induction motor in Matlab Simulink

Для верификации имитационной модели и математического описания  $n$ -фазной машины использовались аналитические выражения при неподвижном роторе. Такой подход исключает из решений расчётную погрешность при использовании численных методов и даёт возможность оценить адекватность результатов. Ввиду определенных сложностей, связанных с формированием аналитических выражений для  $n$ -фазной машины при неподвижном роторе, взят частный случай при  $n=3$ .

В качестве критерия для оценки работоспособности предложенной имитационной модели  $n$ -фазной машины выбрана огибающая токов статора:

$$I_0(t) = \sqrt{I_A^2(t) + I_B^2(t) + I_C^2(t)}.$$

На основе фазных статорных токов проведены вычисления огибающих по аналитическим уравнениям, затем получены данные с помощью имитационной модели (рис. 5) при  $n=3$ , что соответствует описанию асинхронной машины в естественной системе координат и при  $n=28$ , а также для асинхронной машины в неподвижной  $\alpha, \beta$  системе координат. Имитация неподвижного ротора для многофазной машины при  $n=3, n=28$  и для двухфазной модели осуществлялась путем задания угловой скорости ротора равной нулю  $\omega=0$ .

Для корректного сравнения огибающих токов статора все они были приведены к трехфазной системе координат с применением масштабирующего коэффициента  $k$  в блоке – 7, который определялся по выражению (8).

Приведем пример аналитического определения токов статора и ротора для асинхронного двигателя

при неподвижном роторе с параметрами двигателя АДМ100S4У3 (табл. 2). Внешнее воздействие в статорной цепи будем считать симметричным, начальные условия задачи примем нулевыми

$$i_a(0) = i_b(0) = i_c(0) = i_A(0) = i_B(0) = i_C(0) = 0.$$

С учетом условия задачи  $U_A(t) + U_B(t) + U_C(t) = 0$  получаем на основе (13):

$$\mathbf{B}(t) = \frac{1}{2L_S L_R + L_m (L_R + L_S - 4L_m)} \times \begin{pmatrix} -3L_m \cdot U_A \\ -3L_m \cdot U_B \\ -3L_m \cdot U_C \\ \frac{(L_m (2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S) U_A}{L_S - L_m} \\ \frac{(L_m (2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S) U_B}{L_S - L_m} \\ \frac{(L_m (2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S) U_C}{L_S - L_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -39,246U_A(t) \\ -39,246U_B(t) \\ -39,246U_C(t) \\ 40,959U_A(t) \\ 40,959U_B(t) \\ 40,959U_C(t) \end{pmatrix}.$$

Корни характеристического уравнения будут:

$$p_1 = -159,714 \frac{1}{c}, \quad p_2 = -168,273 \frac{1}{c},$$

$$p_3 = p_4 = -163,482 \frac{1}{c}, \quad p_5 = p_6 = -3,098 \frac{1}{c}.$$

Коэффициенты разложения экспоненциальной матрицы определяются системой:

$$\begin{pmatrix} \alpha_0(t) \\ \alpha_1(t) \\ \alpha_2(t) \\ \alpha_3(t) \\ \alpha_4(t) \\ \alpha_5(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -159,714 & 2,551 \cdot 10^3 & -4,074 \cdot 10^6 & 6,507 \cdot 10^8 & -1,039 \cdot 10^{11} \\ 1 & -168,273 & 2,832 \cdot 10^4 & -4,765 \cdot 10^6 & 8,018 \cdot 10^8 & -1,349 \cdot 10^{11} \\ 1 & -163,482 & 2,673 \cdot 10^4 & -4,369 \cdot 10^6 & 7,143 \cdot 10^8 & -1,168 \cdot 10^{11} \\ 1 & -163,483 & 2,673 \cdot 10^4 & -4,369 \cdot 10^6 & 7,143 \cdot 10^8 & -1,168 \cdot 10^{11} \\ 1 & -3,098 & 9,599 & -29,738 & 92,14 & -258,45 \\ 1 & -3,099 & 9,605 & -29,767 & 92,25 & -258,45 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} e^{-j159,714t} \\ e^{-j168,273t} \\ e^{-j163,482t} \\ e^{-j163,482t} \\ e^{-j3,098t} \\ e^{-j3,098t} \end{pmatrix}.$$

После вычисления интеграла (14) с нулевыми начальными условиями получаем графические зави-

симости, представленные на интервале длительностью в три периода для токов ротора (рис. 6) и статора (рис. 7), где пунктирными линиями показаны значения для статического режима.

На рис. 8 показаны огибающие токов статора при неподвижном роторе, полученные аналитическим и численным способом. Из данных кривых видно, что огибающие токов 2, 3, 4, полученные численным методом, имеют схожий вид. Наибольшее расхождение наблюдается с кривой тока 1, которая получена аналитическим способом. На основе результатов рис. 8 можно сделать вывод, что погрешность для  $n$ -фазной модели находится на приемлемом уровне и эту модель можно использовать для дальнейших исследований.

Исследование обрыва стержней в роторе для  $n$ -фазной асинхронной машины осуществлялось путем введения добавочного сопротивления в уравнения для соответствующей фазы. Данная модель позволяет задавать количество обрывов и место их расположения.

При появлении аварийных стержней в огибающей токов статора наблюдаются гармонические колебания (рис. 9), которые зависят от текущей нагрузки и от процентного соотношения дефектных стержней и нормальных. На рис. 9 показаны кривые токов статора в различных режимах работы (пуск, холостой ход, нагрузка) при разных состояниях роторной цепи (1, 2, 3, 4 оборванных стержня).

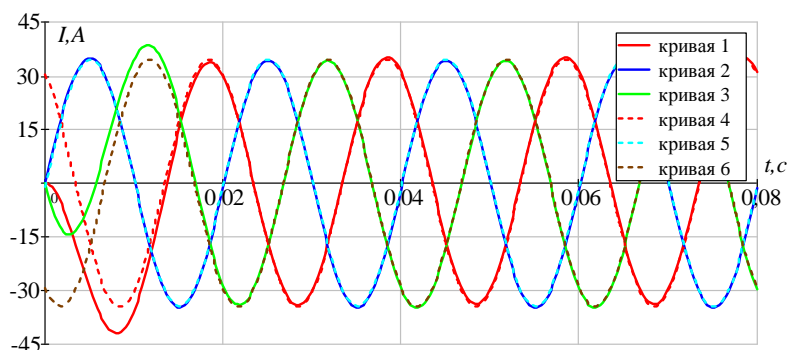


Рис. 6. Кривые 1–3 – токи ротора фазы a, b, c в переходном процессе соответственно. Кривые 4–6 – токи ротора фазы a, b, c в установившемся процессе соответственно

Fig. 6. Curves 1–3 are rotor currents of the phase a, b, c in transient process, respectively. Curves 4–6 are rotor currents of phases a, b, c in a steady process, respectively

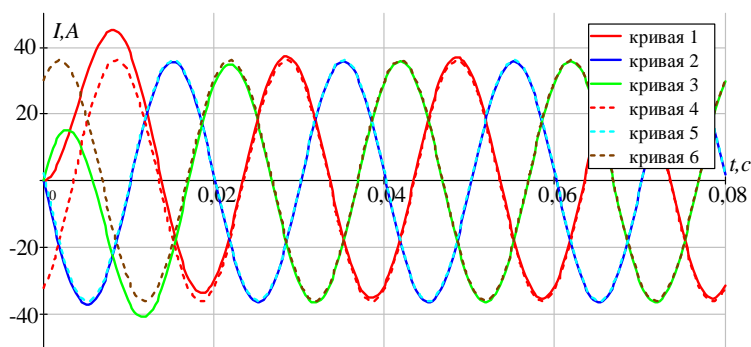
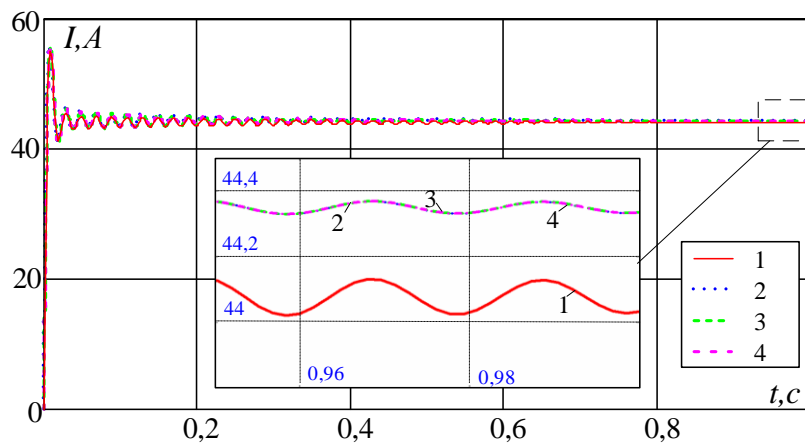


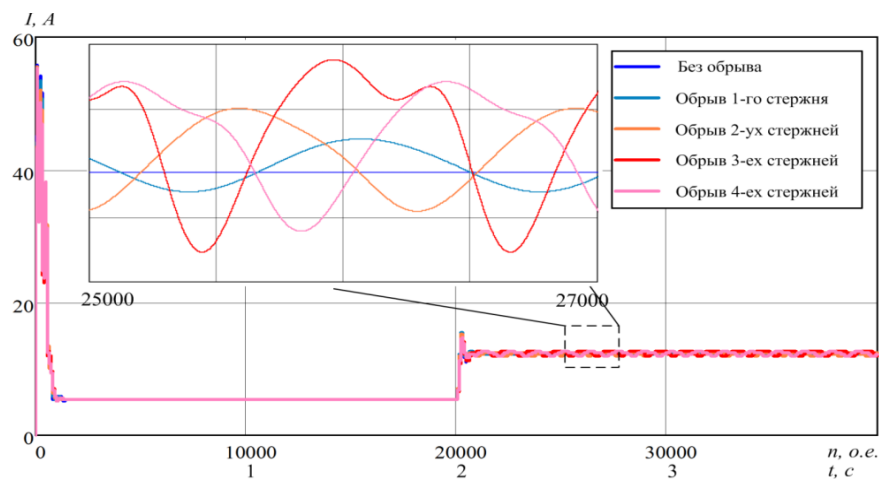
Рис. 7. Кривые 1–3 – токи статора фазы A, B, C в переходном процессе соответственно. Кривые 4–6 – токи ротора фазы A, B, C в установившемся процессе соответственно

Fig. 7. Curves 1–3 are stator currents of phases A, B, C in the transient process, respectively. Curves 4–6 are rotor currents of phases A, B, C in a steady process, respectively



**Рис. 8.** Огибающие токов статора при неподвижном роторе: 1 – эталонные значения, полученные аналитическим способом; 2 – кривая, полученная численным способом для многофазной машины при  $n=3$ ; 3 – Кривая, вычисленная численным способом для двухфазной машины в неподвижной  $\alpha, \beta$  системе координат; 4 – кривая, полученная численным способом для многофазной машины при  $n=28$

**Fig. 8.** Stator current envelopes: 1 – reference values obtained analytically; 2 – curve calculated numerically for a multiphase machine with  $n=3$ ; 3 – curve calculated numerically for a two-phase machine in a fixed  $\alpha, \beta$  coordinate system; 4 – curve calculated numerically for a multiphase machine with  $n=28$



**Рис. 9.** Огибающие токов статора в различных режимах

**Fig. 9.** Stator current envelope in different modes

Из рис. 9 видно, что гармонические колебания при обрыве стержней имеют определённую частоту и амплитуду. Анализируя эти составляющие, а также их форму, можно сделать выводы о текущем состоянии двигателя. Огибающая токов статора содержит диагностический признак, позволяющий с определённой точностью определить обрыв стержня в роторе.

На данный момент существуют различные подходы и методы, которые позволяют выявлять из токов, напряжений и других информационных сигналов нужный диагностический признак, а также получать оценку текущего состояния электрической машины [16–21]. Данные диагностические системы строятся на основе использования определенного математического аппарата, который дает возможность сформировать численную оценку. Предложенная  $n$ -фазная модель позволяет на основе результатов моделирования выявить работоспособный подход для диагностики обрыва стержней в роторной цепи.

### Заключение

Разработана  $n$ -фазная математическая модель асинхронной машины, которая позволяет с приемлемой точностью исследовать работу двигателя как в нормальном состоянии, так и при обрыве стержней. Описание процессов в статоре и роторе с одной и той же размерностью системы координат приводит к значительному увеличению времени моделирования при большом количестве стержней.

Для исследования режимов работы асинхронной машины при неподвижном роторе предложено решение, полученное аналитическим способом. Данный подход существенно снижает требования к вычислительным мощностям.

Адекватность математического описания  $n$ -фазной машины подтверждено с помощью огибающих токов статора, которые были получены при помощи аналитических выражений и  $n$ -фазной модели.

Показано, что кривая огибающей токов статора изменяет свою форму в зависимости от количества исключенных из расчетов стержней ротора математи-

ческой модели и позволяет выявить диагностический признак, который характеризует состояние электро-двигателя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2017. – 152 с.
2. Зюзев А.М., Метельков В.П. О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокоинерционных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 96–103.
3. Ouadah M., Touhami O., Ibtouen R. Improvement of the detection of the defect squirrel cage rotor by the study of additional components of the space harmonics // Electrical Engineering. – 2018. – V. 100. – P. 2485–2497.
4. Kumar P., Hati A.S. Deep convolutional neural network based on adaptive gradient optimizer for fault detection in SCIM // ISA Transactions. – 2021. – V. 111. – P. 350–359.
5. Abdi Monfared O., Doroudi A., Darvishi A. Diagnosis of rotor broken bars faults in squirrel cage induction motor using continuous wavelet transform // COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2019. – V. 38. – № 1. – P. 167–182.
6. De La Barrera P.M., Otero M., Schallschmidt T. Active broken rotor bar diagnosis in induction motor drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2021. – V. 68. – № 8 – P. 7556–7566.
7. Fault diagnosis of mine asynchronous motor based on MEEMD energy entropy and ANN / Z. Yang, C. Kong, Y. Wang, X. Rong, L. Wei // Computers and Electrical Engineering. – 2021. – V. 92. – P. 568–575.
8. An analytical model for squirrel cage induction machine with broken rotor bars derived based on the multiple coupled circuit theory and the winding function approach / Q. Fu, Q. Guo, W. Hang, W. Cui, L. Zhao // International Journal of Circuit Theory and Applications. – 2021. – V. 49. – № 6. – P. 1633–1658.
9. Лавренов Е.О. Методы компенсации влияния электрической несимметрии на механический момент индукционного двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 72–78.
10. Зюзев А.М., Метельков В.П. Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – Т. 34 – № 1. – С. 60–67.
11. Tarek A., Yassine K., Ahmed T. Modeling and diagnostics of inductions machines under rotor failure // Automatic Control and System Engineering journal. – 2007. – V. 7. – № 2. – P. 9–18.
12. Математическое моделирование асинхронных двигателей при повреждениях стержней короткозамкнутого ротора / В.Ф. Сивкобыленко, В.А. Павлюков, В.П. Сердюков, В.И. Бондаренко, С.П. Яременко // ДонНТУ. – 2009. – Т. 158. – № 9. – С. 222–226.
13. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
14. Новожилов А.Н., Потапенко А.О., Новожилов Т.А. Моделирование процессов в асинхронном двигателе с поврежденным стержнем короткозамкнутого ротора в режиме выбега // Электротехника. – 2017. – № 1. – С. 2–6.
15. Mathematical model of induction motor with series-connected stator and rotor windings /
16. Funk T.A., Usynin Yu.S., Grebnev A.I., Ponomov D.A. // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. – 2017. – V. 17. – № 1. – P. 77–87.
17. Choudhary A., Goyal D., Shimi S.L. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: a review // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2019. – V. – 26. – P. 1221–1238.
18. Induction machine model with space harmonics for fault diagnosis based on the convolution theorem / J. Martinez-Roman, R. Puche-Panadero, M. Pineda-Sanchez, J. Perez-Cruz, M. Riera-Guasp // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2018. – V. 100. – P. 463–481.
19. The Matlab Simulink model of transformer winding when its diagnosis by short duration puls takes place / V.A. Kolchanova, Y.N. Isaev, S.S. Tarasenko, A.I. Filkov // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. – Tomsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. – P. 1–4.
20. Duda A., Sulowicz M. A new effective method of induction machine condition assessment based on zero-sequence voltage (ZSV) symptoms // Energies. – 2020. – V. 13. – P. 1–25.
21. Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин по статорным токам / В.В. Тимошкин, Т.А. Глазырина, В.И. Полищук, А.С. Глазырин // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 42–46.

Поступила 13.10.2021 г.

#### Информация об авторах

**Глазырин А.С.**, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

**Полищук В.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

**Тимошкин В.В.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Баннов Д.М.**, инженер кафедры электрических станций Электротехнического факультета, Самарский государственный технический университет.

**Исаев Ю.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Антяскин Д.И.**, инженер-электроник, ООО «Комплексные автоматизированные системы».

**Кладиев С.Н.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.



**Филипас А.А.**, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ланграф С.В.**, кандидат технических наук, руководитель сектора разработки встроенного ПО, ООО «НПФ Мехатроника-Про».

**Котин Д.А.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета.

**Ковалев В.З.**, доктор технических наук, профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

UDC 621.313.33

## MODELLING OF INDUCTION MOTOR IN MULTIPHASE COORDINATE SYSTEM FOR ASYMMETRY ROTOR CAGE

**Alexander S. Glazyrin**<sup>1,2</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

**Vladimir I. Polishchuk**<sup>3</sup>,  
polischuk\_vi@mail.ru

**Vadim V. Timoshkin**<sup>1</sup>,  
tim\_vv@mail.ru

**Dmitry M. Bannov**<sup>4</sup>,  
bannov.dm@samgtu.ru

**Yusup N. Isaev**<sup>1</sup>,  
isaev\_yusup@mail.ru

**Dmitriy I. Antyaskin**<sup>5</sup>,  
antyaskin.dmitriy@gmail.com

**Sergey N. Kladiyev**<sup>1</sup>,  
kladiyev@tpu.ru

**Alexander A. Filipas**<sup>1</sup>,  
filipas@tpu.ru

**Sergey V. Langraf**<sup>6</sup>,  
sergeylgrf@gmail.com

**Denis A. Kotin**<sup>7</sup>,  
d.kotin@corp.nstu.ru

**Vladimir Z. Kovalev**<sup>2</sup>,  
vz\_kovalev@mail.ru

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

<sup>2</sup> Yugra State University,  
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

<sup>3</sup> Polzunov Altai State Technical University, Lenin avenue,  
46, Lenin avenue, Barnaul, 656038, Russia.

<sup>4</sup> Samara State Technical University,  
224, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

<sup>5</sup> Integrated automated systems,  
240a, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.

<sup>6</sup> NPF Mekhatronika-Pro LTD,  
119E, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.

<sup>7</sup> Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marx avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

**Relevance** of the study is caused by an urgent need in theoretical justification and practical development of selective methods of diagnosing complex internal damages of powerful high-voltage squirrel-cage induction motors, which are one of the main elements of responsible mechanisms of all technological processes in fuel and energy complex. As a rule, specificity of work of high-voltage squirrel-cage motors in fuel and energy complex, both at a stage of extraction and transportation of georesources, and at a stage of their processing, are heavy conditions of start-up, especially it is expressed for critical mechanisms of thermal power plants (feed pumps, mills, crushers, smoke exhausters, blowers, etc.). Failures of squirrel-cage induction motors of critical mechanisms at thermal power plants lead to either shutdown of a power unit or at least to reduction of a level of electric power generation. At the same time, despite the gravest and, as a rule, irreversible consequences, there are no protections against such damage as defects in short-circuited winding of squirrel-cage induction motor rotor and such damage is detected only during overhaul. Broken-rotor-bar in the initial stage is latent and is a trigger for the development of more dangerous emergency modes. Lack of tested technical means for diagnostics of this type of damage is first of all related to insufficient formalization of mathematical description of processes in squirrel-cage induction motor when defects in rotor winding occur.

**Object:** high voltage squirrel-cage induction AC motors.

**The aim** of the research is to perform modeling of induction machine with electrical asymmetry rotor, adequately reflecting physical processes in the machine when damage occurs in the rotor cage.

**Methods.** Theoretical research methods were used to solve the problem. They include: the theory of electrical machines, numerical methods. Simulation modeling was performed in MatLab environment, and mathematical data processing in MathCad package.

**Results.** An  $n$ -phase simulation model of an induction motor has been developed, which allows us to investigate the broken rotor bar in a squirrel-cage. Proposed analytical expressions, which describe the motor operation when the rotor is stationary.

**Key words:**

Induction motor, mathematical model, squirrel-cage, broken rotor bar, technical condition.

## REFERENCES

- Safin N.R. *Sovershenstvovanie metodiki tokovoy diagnostiki asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom*. Dis. Kand. nauk [Improvement of the method of current diagnostics of inductions motors with squirrel-cage rotor. Cand. Diss.]. Ekaterinburg, 2017. 152 p.
- Zyuzev V.P., Metelkov Problem of induction motors rotor winding overheating in starting modes of high-inertia electric drives of oil and mining industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 96–103. In Rus.
- Ouah M., Touhami O., Ibtouen R. Improvement of the detection of the defect squirrel cage rotor by the study of additional components of the space harmonics. *Electrical Engineering*, 2018, vol. 100, pp. 2485–2497.
- Kumar P., Hati A.S. Deep convolutional neural network based on adaptive gradient optimizer for fault detection in SCIM. *ISA Transactions*, 2021, vol. 111, pp. 350–359.
- Abdi Monfared O., Doroudi A., Darvishi A. Diagnosis of rotor broken bars faults in squirrel cage induction motor using continuous wavelet transform. *COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2019, vol. 38, no. 1, pp. 167–182.
- De La Barrera P.M., Otero M., Schallschmidt T. Active broken rotor bar diagnosis in induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 68, no. 8, pp. 7556–7566.
- Yang Z., Kong C., Wang Y., Rong X., Wei L. Fault diagnosis of mine asynchronous motor based on MEEMD energy entropy and ANN. *Computers and Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, pp. 568–575.
- Fu Q., Guo Q., Hang W., Cui W., Zhao L. An analytical model for squirrel cage induction machine with broken rotor bars derived based on the multiple coupled circuit theory and the winding function approach. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2021, vol. 49, no. 6, pp. 1633–1658.
- Lavrenov E.O. Compensation methods of electrical asymmetry effect on induction motor moment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 72–78. In Rus.
- Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Analytical method for evaluation of high-voltage induction motor rotor winding heating at start-up mode. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*, 2016, vol. 34, no. 1, pp. 60–67. In Rus.
- Tarek A., Yassine K., Ahmed T. Modeling and diagnostics of inductions machines under rotor failure. *Automatic Control and System Engineering journal*, 2007, vol. 7, no. 2, pp 9–18.
- Sivokobylenko V.F., Pavlyukov V.A., Serdyukov V.P., Bondarenko V.I., Yaremenko S.P. Matematicheskoe modelirovanie asinkhronnykh dvigateley pri povrezhdeniyakh sterzhney korotkozamknutogo rotora [Mathematical modeling of inductions motors in case of broken rotor bar]. *DonNTU*, 2009, vol. 158, no. 9, pp. 222–226.
- Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin Publ., 2008. 298 p.
- Novozhilov A.N., Potapenko A.O., Novozhilov T.A. Modeling of processes in an asynchronous motor with a damaged squirrel cage rotor bar in the coasting mode. *Electrical engineering*, 2017, no. 1, pp. 2–6. In Rus.
- Funk T.A., Usynin Yu.S., Grebnev A.I., Ponosov D.A. Mathematical model of induction motor with series-connected stator and rotor windings. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2017, vol. 17, no 1, pp. 77–87.
- Choudhary A., Goyal D., Shimi S.L. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2019, vol. 26, pp. 1221–1238.
- Martinez-Roman J., Puche-Panadero R., Pineda-Sanchez M., Perez-Cruz J., Riera-Guasp M. Induction machine model with space harmonics for fault diagnosis based on the convolution theorem. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018, vol. 100, pp. 463–481.
- Asad B., Vaimann T., Belahcen A., Kallaste A., Rassõlkin A., Iqbal M.N. Modified winding function-based model of squirrel cage induction motor for fault diagnostics. *IET Electric Power Applications*, 2020, vol. 14, no. 9, pp. 1722–1734.
- Duda A., Sulowicz M. A new effective method of induction machine condition assessment based on zero-sequence voltage (ZSV) symptoms. *Energies*, 2020, vol. 13, pp. 1–20.
- Kolchanova V.A., Isaev Y.N., Tarasenko S.S., Filkov A.I. The Matlab Simulink model of transformer winding when its diagnosis by short duration puls takes place. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*. Tomsk, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. pp. 1–4.
- Timoshkin V.V., Glazyrina T.A., Polishchuk V.I., Glazyrin A.S. Functional Wavelet diagnostics of three-phase electric machine rotor windings condition by stator currents. *Elektrichestvo*, 2012, no. 6, pp. 42–46. In Rus.

Received: 13 October 2021.

## Information about the authors

**Alexander S. Glazyrin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yugra State University.

**Vladimir I. Polishchuk**, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

**Vadim V. Timoshkin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry M. Bannov**, engineer, Samara State Technical University.

**Yusup N. Isaev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey N. Kladiev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitriy I. Antyashkin**, electronic engineer, Integrated automated systems.

**Alexander A. Filipas**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey V. Langraf**, head of the embedded software development sector, NPF Mekhatronica-Pro Ltd.

**Denis A. Kotin**, Cand. Sc., head of the department, Novosibirsk State Technical University.

**Vladimir Z. Kovalev**, Dr. Sc., professor, Yugra State 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)

Дата выхода 30.10.2021. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,52. Уч.-изд. л. 23,99.  
Заказ 210-21. Тираж 500 экз. Цена 1020 руб.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.