



**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Том 332, № 2, 2021  
Издается с 1903 г.**

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

**Volume 332, № 2, 2021  
Published since 1903**

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 332, № 2, 2021

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

## Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

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

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 геоактивов.

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

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

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

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

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

Volume 332, № 2, 2021

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

**Editorial Board**

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

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Комплексные геохимические исследования компонентов природной среды в эндемичных районах Забайкалья**  
Рихванов Л.П., Соктоев Б.Р., Барановская Н.В., Агеева Е.В., Беляновская А.И., Дериглазова М.А., Юсупов Д.В., Эпова Е.С., Солодухина М.А., Замана Л.В., Михайлова Л.А., Большунова Т.С., Миронова А.С., Наркович Д.В., Судыко А.Ф., Полякова Д.А.
- Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область)**  
Бортникова С.Б., Юркевич Н.В., Еделева А.В., Саева О.П., Грахова С.П., Волынкин С.С., Карин Ю.Г.
- Идентификация отходов бурения и их использование**  
Третьяк А.А., Яценко Е.А., Онофриенко С.А., Карельская Е.В.
- Паровая бескислородная газификация в условиях полигенерации**  
Шевырёв С.А., Стрижак П.А., Ральф-Юве Дитрих, Богомолов А.Р.
- Первые данные по изотопному составу пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области**  
Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Рыжкова С.В.
- Современное состояние молибденовой промышленности России**  
Боярко Г.Ю., Хатков В.Ю.
- Оценка загрязнения Баренцева моря плавающим морским мусором по данным судовых наблюдений в 2019 г.**  
Погожева М.П., Якушев Е.В., Терский П.Н., Глазов Д.М., Аляутдинов В.А., Коршенко А.Н., Ханке Г., Семилетов И.П.
- Определение условий и характеристик зажигания частиц влажной древесины для повышения ресурсоэффективности теплоэнергетики**  
Косторева Ж.А., Малышев Д.Ю., Сыродой С.В.
- Физико-химические свойства нефти месторождений Восточной и Западной Сибири: комплексное изучение методами диэлектрической спектроскопии и ЯМР-релаксометрии**  
Мезин А.А., Шумскайте М.Й., Чернова Е.С., Бурухина А.И.
- Исследование взаимодействия между нагнетательными и добывающими скважинами на основе построения многоуровневых моделей**  
Пономарева И.Н., Мартюшев Д.А., Черный К.А.
- Анализ землеустройства лесного фонда**  
Пасько О.А., Захарченко А.В., Ковязин В.Ф.
- К определению габаритов камеры реактора по плавлению базальта**  
Чаймелов А.А., Строгонов К.В.
- Повышение эффективности избирательной кислотной обработки скважин путем применения точечной гидropескоструйной перфорации**  
Хабибуллин М.Я., Гилаев Г.Г.
- Геолого-физические особенности разработки слабоконсолидированных коллекторов вязкой нефти**  
Ильясов И.Р., Грачев С.И.
- Оценка совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором**  
Копырин В.А., Хамитов Р.Н., Глазырин А.С., Кладиев С.Н., Раков И.В., Портнягин А.Л., Маркова А.А.
- 7 Comprehensive geochemical research of the environmental components in endemic areas of Transbaikalia**  
Rikhvanov L.P., Soktoev B.R., Baranovskaya N.V., Ageeva E.V., Belyanovskaya A.I., Deriglazova M.A., Yusupov D.V., Epova E.S., Solodukhina M.A., Zamana L.V., Mikhailova L.A., Bolshunova T.S., Mironova A.S., Narkovich D.V., Sudyko A.F., Polyakova D.A.
- 26 Hydrochemical and gaseous anomalies on sulfide tailings (Salair, Kemerovo region)**  
Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Edelev A.V., Saeva O.P., Grakhova S.P., Volynkin S.S., Karin Yu.G.
- 36 Identification of drilling wastes and their use**  
Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Onofrienko S.A., Karelskaya E.V.
- 44 Oxygen-free steam gasification under polygeneration**  
Shevyrev S.A., Strizhak P.A., Ralph-Uwe Dietrich, Bogomolov A.R.
- 59 The first data on the isotopic composition of stratal waters of the developed oil fields in Novosibirsk region**  
Novikov D.A., Pyrayev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ryzhkova S.V.
- 73 Current state of molybdenum industry in Russia**  
Boyarko G.Yu., Khatkov V.Yu.
- 87 Assessment of Barents sea floating marine macro litter pollution during the vessel survey in 2019**  
Pogojeva M.P., Yakushev E.V., Terskiy P.N., Glazov D.M., Alyautdinov V.A., Korshenko A.N., Hanke G., Semiletov I.P.
- 97 Definition of wet wood particles ignition conditions and characteristics to increase the resource efficiency of heat power engineering**  
Kostoreva Zh.A., Malyshev D.Yu., Syroday S.V.
- 106 Physical/chemical properties of oil from Eastern and Western Siberia deposits: integrated study by dielectric spectroscopy and NMR relaxometry methods**  
Mezin A.A., Shumskayte M.Y., Chernova E.S., Burukhina A.I.
- 116 Research of interaction between expressive and producing wells based on construction of multilevel models**  
Ponomareva I.N., Martyshev D.A., Cherny K.A.
- 127 Analysis of land management of the forest fund**  
Pasko O.A., Zakharchenko A.V., Kovyazin V.F.
- 139 Determining the dimensions of the reactor chamber for basalt melting**  
Chaymelov A.A., Strogonov K.V.
- 146 Increasing the efficiency of well selective acid treatment by applying precision hydro-sand blasting**  
Khabibullin M.Ya., Gilayev G.G.
- 153 Geological and physical characteristics of the field development of unconsolidated viscous oil reservoirs**  
Ilyasov I.R., Grachev S.I.
- 166 Evaluation of total cost of possessing the electric centrifugal pump with submersible compensator**  
Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Rakov I.V., Portnyagin A.L., Markova A.A.

- Геохимические особенности природных вод территории золоторудного месторождения Вьун (Республика Саха-Якутия)**  
Язиков Е.Г., Мишанькин А.Ю., Осипова Н.А., Филимошенко Е.А., Карпенко Ю.А., Собынин Ю.П.
- 176 Geochemical features of natural waters in the Vyun gold deposit (the Republic of Sakha (Yakutia))**  
Yazikov E.G., Mishankin A.Yu., Osipova N.A., Filimonenko E.A., Karpenko Yu.A., Sobyarin Yu.P.
- Исследование эффективности ингибиторов гидратообразования в процессе добычи и транспорта углеводородов в морских условиях**  
Китаев С.В., Колотилов Ю.В., Плотников А.Ю., Ковалев А.А., Шейхгасанов Ш.К.
- 190 Study of efficiency of hydrate formation inhibitors in the process of production and transport of hydrocarbons in marine conditions**  
Kitaev S.V., Kolotilov Yu.V., Plotnikov A.Yu., Kovalev A.A., Sheikhgasanov Sh.K.
- Элементный состав природных вод и вмещающих отложений Кузбасса с оценкой водной миграции (на примере Нарыкско-Осташкинской площади)**  
Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В.
- 200 Elemental composition of natural waters and host sediments of the Kuzbass with an assessment of water migration (on the example of the Naryk-Ostashkin area)**  
Lepokurova O.E., Domrocheva E.V.
- Голоморфное погружение как метод расчета установившихся режимов электрических сетей нефтяных и газовых месторождений и оценки их устойчивости**  
Исаев Ю.Н., Кабалин Д.А., Филипас А.А.
- 214 Holomorphic embedding as analytical technique for calculating electric grids of oil and gas deposits and assessing their stability**  
Isaev Yu.N., Kabalin D.A., Filipas A.A.
- Исследование эффективности перераспределения мощности силового привода нефтедобывающего комплекса на малодебитных скважинах при внедрении конструкции электрогидроцилиндра рекуперативного действия**  
Савинкин В.В., Санду А.В., Ратушная Т.Ю., Визуриане П., Колисниченко С.В., Омаров М.Ш.
- 229 Study of redistribution of the oil complex power drive effectiveness for marginal wells when installing construction of recuperative action electro hydro cylinder**  
Savinkin V.V., Sandu A.V., Ratushnaya T.Yu., Vizureanu P., Kolisnichenko S.V., Omarov M.Sh.

УДК 550.42:504(571.55)

## КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ В ЭНДЕМИЧНЫХ РАЙОНАХ ЗАБАЙКАЛЬЯ

**Рихванов Леонид Петрович<sup>1</sup>**

**Соктоев Булат Ринчинович<sup>1</sup>,**  
bulatsoktoev@tpu.ru

**Барановская Наталья Владимировна<sup>1</sup>,**  
nata@tpu.ru

**Агеева Елена Владимировна<sup>1</sup>,**  
ev\_ageeva@mail.ru

**Беляновская Александра Игоревна<sup>1</sup>,**  
aib28@tpu.ru

**Дериглазова Мария Александровна<sup>1</sup>,**  
belyakinama@gmail.com

**Юсупов Дмитрий Валерьевич<sup>1,2</sup>,**  
yusupovd@mail.ru

**Эпова Екатерина Сергеевна<sup>3</sup>,**  
apikur1@ya.ru

**Солодухина Мария Анатольевна<sup>3</sup>,**  
mabn@ya.ru

**Замана Леонид Васильевич<sup>3</sup>,**  
l.v.zamana@mail.ru

**Михайлова Лариса Альфредасовна<sup>4</sup>,**  
mihailova-la@mail.ru

**Большунова Татьяна Сергеевна<sup>5</sup>,**  
bts26@mail.ru

**Миронова Анастасия Сергеевна<sup>1</sup>,**  
nasie2710@gmail.com

**Наркович Дина Владимировна<sup>1</sup>,**  
shvezova\_d@mail.ru

**Судыко Александр Федорович<sup>1</sup>,**  
sudykoaf@yandex.ru

**Полякова Дарья Анатольевна<sup>1</sup>,**  
darya.darya2012@mail.ru

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

<sup>2</sup> Амурский государственный университет, Россия, 675027, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21.

<sup>3</sup> Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 672002, г. Чита, ул. Недорезова, 16а.

<sup>4</sup> Читинская государственная медицинская академия, Россия, 672000, г. Чита, ул. Горького, 39а.

<sup>5</sup> АО «ТомскНИПИнефть», Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

**Актуальность исследования.** Болезнь Кашина–Бека (уровская болезнь) является классическим примером класса эндемических болезней. Однако, в отличие от других болезней, для данного заболевания до сих пор не установлена причина возникновения. В настоящее время в научной литературе обсуждается более 20 теорий и гипотез, объясняющих этиологию и факторы болезни. Приоритетной теорией является биогеохимическая, согласно которой возникновение и течение болезни зависит от фактора окружающей среды (недостаток/избыток химических элементов или соединений). В связи с этим изучение химического состава компонентов окружающей среды в районе распространения болезни Кашина–Бека является актуальным.

**Цель:** оценка геохимических особенностей компонентов природной среды на территории юго-восточного Забайкалья – района распространения болезни Кашина–Бека.

**Объекты:** компоненты природной среды – почва, донные отложения, природные воды (поверхностные, подземные), солевые отложения питьевых вод, керн годовых колец деревьев, листья тополя, лишайники, мхи, польнь, картофель, волосы детей, кости свины домашней.

**Методы:** элементный состав изученных компонентов природной среды определен методами инструментального нейтронно-активационного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Обработка полученных данных включала нормирование содержания химических элементов относительно фоновых показателей (кларк ноосферы, вода оз. Байкал) и расчет индикаторных отношений.

**Результаты.** Изучено содержание 26 (по данным инструментального нейтронно-активационного анализа) и 62 (по данным масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой) химических элементов в 13 компонентах природной среды. В элементном составе всех изученных компонентов выявлена региональная геохимическая ассоциация (Zn-Pb-Ba-Sb-As-Bi-Au), связанная с особенностями металлогенеза района. Для проведения будущих исследований наиболее информативными компонентами являются природные воды, костная ткань, волосы детей. Наиболее контрастная геохимическая специализация окружающей среды формируется в населенных пунктах, где по литературным данным наблюдались максимальные уровни заболеваемости болезни Кашина–Бека. Этиология болезни носит многофакторный характер: в развитии заболевания большую роль играют природные условия, что приводит к дисбалансу элементного состава компонентов окружающей среды и, соответственно, организма человека.

### **Ключевые слова:**

Болезнь Кашина–Бека, уровская болезнь, юго-восточное Забайкалье, геохимия окружающей среды, индикаторные отношения.



## Введение

Геохимические исследования в зависимости от решаемых задач (геологические, экологические) имеют свои особенности и базируются на основных принципах, разработанных как результат их практического использования отечественными и зарубежными исследователями. На сегодняшний день имеется большое количество публикаций (Н.И. Сафонов, А.П. Соловов, С.В. Григорян, В.Л. Барсуков, Л.Н. Овчинников, П.В. Коваль, В.И. Гребенщикова, А. Левинсон и другие), методических инструкций, рекомендаций и указаний для проведения и использования различных геохимических методов в практике геологоразведочных работ: на стадии глобальных, региональных, поисковых и детальных работ в рудных районах, геолого-экономической оценки месторождений. Существующие инструкции, справочники [1] и опубликованные материалы по геохимическим методам поисков рудных месторождений содержат указания о том, какие компоненты окружающей среды (почва, донные отложения, снеговой покров и т. д.) можно использовать в геохимических исследованиях, а также рекомендации по плотности сети отбора проб и минимального количества проб на единицу площади. В этих документах также изложены сведения о методиках подготовки проб и аналитических методах, используемых для определения химического состава. Эти два вопроса являются краеугольными в геохимических работах, независимо от их целевого назначения [2].

Для эколого-геохимических исследований характерна своя специфика: во-первых, за счет расширения объектов исследования (волосы, кровь и другие) и спектра анализируемых элементов, во-вторых, необходимо учитывать больше внешних факторов, таких как роза ветров и время опробования. В ряде исследований используется подход с отбором сопряженных (максимально близких в пространстве) проб различных компонентов природной среды. При обработке полученных данных используются специфические геохимические показатели, например суммарный показатель загрязнения (СПЗ), коэффициент концентрации (КК) и другие.

Подходы к решению экологических задач с использованием геохимических методов были заложены в работах А.А. Беуса, Н.Ф. Глазовского, М.А. Глазовской, В.И. Гребенщиковой, В.Б. Ильина, П.В. Ковалева, И.С. Ломоносова, Т.А. Олигер, Ю.Г. Покатилова, Б.А. Ревича, Н.А. Рослякова, Ю.Е. Саета, Р.Р. Брукса, А. Кабата-Пендиас, Дж.В. Мура, К. Турекьяна. В данных работах обсуждается вопрос об экологической оценке состояния окружающей среды, хотя проблема взаимосвязи элементного состава живых организмов и особенностей их функционирования с точки зрения биогеохимии стала предметом исследования гораздо раньше (А.П. Виноградов, В.В. Ковальский и другие) как продолжение геохимических идей В.И. Вернадского в развитии биосферы. К этому времени следует отнести формирование задачи по созданию базы данных о геохимии компонентов природ-

ной среды, находящейся под влиянием живых организмов.

Следующим шагом явилось применение картографических методов в практике эколого-геохимических исследований. В 1972 г. под руководством В.В. Ковальского была составлена первая биогеохимическая карта СССР, на которой были выделены зоны избыточного и недостаточного накопления химических элементов с точки зрения функционирования живых организмов. На этой карте также были отмечены известные на тот момент времени эндемичные районы, в том числе район урвской эндемии в Забайкалье.

За последнее время появились новые термины, тесно связанные с экологической направленностью геохимических исследований: «геохимия окружающей среды», «экологическая геохимия» (Ю.Е. Саета), «геохимическая экология» (В.В. Ковальский), «геохимическая экология болезней» (В.Л. Сусликов), «медицинская геология» (О. Selinus), в которых широко применяются классические методы, используемые геологами. При этом изучаются геохимические особенности не одного компонента (почва, вода, воздух), а их группы с включением косного и биокосного вещества, что требует исследования живого вещества на различных уровнях его организации.

Многолетние исследования большого количества компонентов природной среды, проведенные на разных территориях и с различными задачами, привели авторов к выводу, что решение проблем состояния и прогнозирования здоровья человека, особенно в случаях с неустановленной этиологией, требует комплексного подхода к проведению медико-экологического мониторинга. Такой подход может помочь в выявлении первопричин заболеваемости населения и распространения определённого заболевания.

Анализ накопленного фактического материала позволил выработать ряд общих методологических подходов к проведению оценки эколого-геохимического состояния территорий со сложным характером техногенного воздействия и организации последующего мониторинга. При этом должны соблюдаться следующие базовые принципы:

- 1) исследования должны выполняться комплексно и базироваться на использовании геохимических и геофизических методов при изучении различных компонентов природной среды;
- 2) оценку степени трансформации различных компонентов природной среды необходимо выполнять максимально сближено во времени и в пространстве;
- 3) в исследование необходимо вовлекать депонирующие компоненты природной среды, способные сохранять загрязняющие вещества в течение длительного времени, а временные интервалы поступления поллютантов можно достаточно четко устанавливать в стратифицированных образованиях (торф, годовые кольца деревьев, донные отложения озер, волосы и другие);

- 4) отбор и подготовку проб, а также анализ элементного состава необходимо проводить по единым методикам с применением высокочувствительных аналитических методов (например, ИНАА, ИСП-МС, РФА-СИ), стандартных образцов сравнения на базе аккредитованных лабораторий, при этом следует определять максимально возможный спектр химических компонентов (тяжелые металлы, радиоактивные и редкоземельные элементы, основные органические соединения), микробиологический состав вод, почв и т. д.;
- 5) следует использовать геохимические и биоиндикаторные показатели (хромосомные aberrации, микроядерный тест и другие), особенно в районах, где присутствуют сложные химические и радиационные факторы воздействия;
- 6) картографическую привязку точек отбора следует осуществлять в единой системе координат, а создание карт проводить с использованием современных ГИС-технологий;
- 7) математическая обработка данных, построение моно- и полифункциональных карт осуществляется по единым методикам.

Параллельно с геохимическими исследованиями специалистами-медиками на изучаемой территории проводится сбор медицинских данных, отбор проб для анализа медицинских показателей.

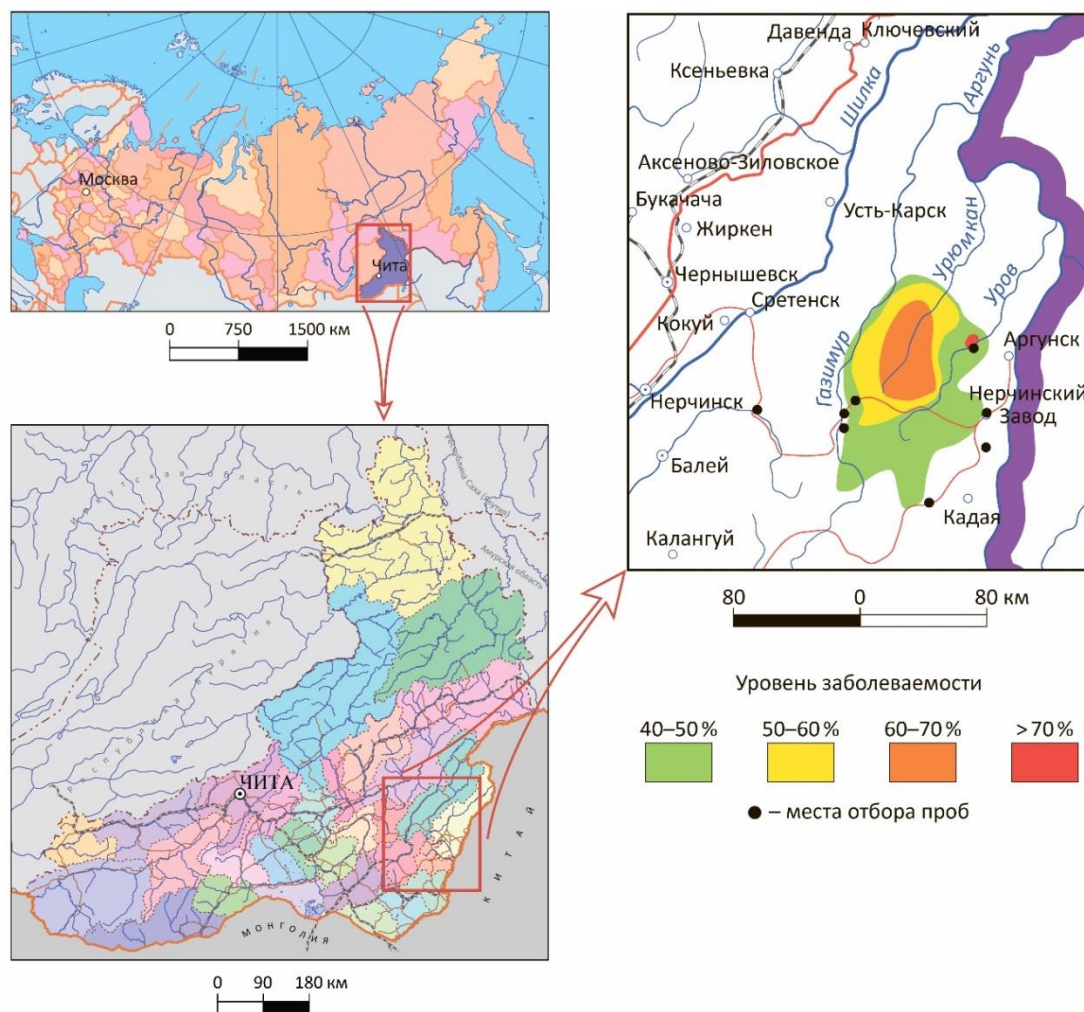
Именно такой подход к анализу и оценке ситуации был назван нами медико-эколого-геохимическим мониторингом и реализован в 1993–2006 гг. на территории Томского района. Этот подход используется нами и в других исследованиях, но, к сожалению, без широкого проведения медицинских исследований [3].

Описанное в данной статье исследование базируется на этом же подходе.

#### Характеристика района исследования

Рассматриваемый район (юго-восток Забайкалья) известен в научной литературе как первый установленный очаг распространения классического примера эндемической болезни – болезни Кашина–Бека (БКБ, урловская болезнь, Kashin–Beck disease – KBD) (рис. 1).

Согласно литературным данным ареал заболевания установлен не только в данном регионе, но также и в Амурской области, Китае, Вьетнаме и Корее [5–9]. В районах проявления болезни Кашина–Бека проживает не менее 38 миллионов человек [8, 10, 11].

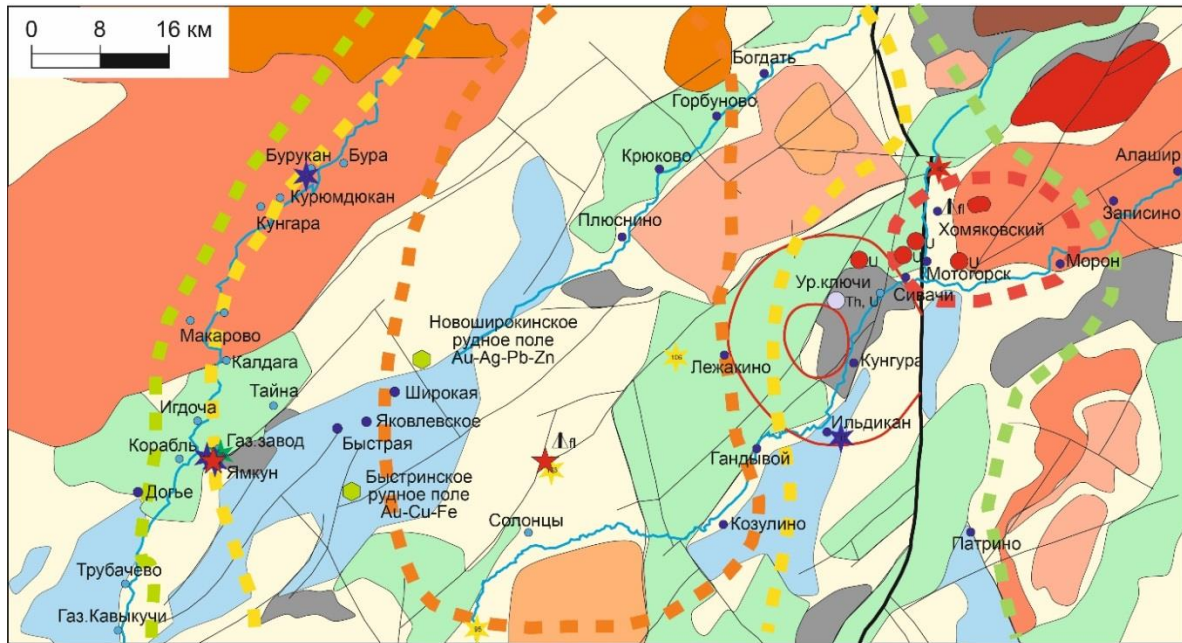


**Рис. 1.** Район исследования: схематическая карта распространения болезни Кашина–Бека в Восточном Забайкалье (основана на материалах карты [4]) и места отбора проб

**Fig. 1.** Investigation area: schematic map of Kashin–Beck disease spatial distribution (based on the map [4]) and sampling sites

Болезнь проявляется в виде деформирующего хондроостеоартроза, поражающего опорно-двигательный аппарат; в крайних формах внешне выражена в виде низкорослости, короткопалости рук («медвежья лапа»), деформации скелета, что, в конечном счете, приводит к потере трудоспособности. Болезнь развивается преимущественно в детском и юношеском возрасте: пик заболеваемости приходится на возраст 8–19 лет, при этом болезнь развивается 5–8 лет.

Район распространения БКБ в Восточном Забайкалье приурочен к весьма сложной геологической структуре длительного развития, известного под общим названием Монголо-Охотский складчатый пояс. В пределах этой части пояса развиты породы докембрия (гранито-гнейсовые купольные структуры), кембрия (карбонатно-терригенные осадочные отложения), юры и мела (вулканогенно-осадочные толщи), которые сохранились в наложенных впадинах типа грабен-синклиналей (рис. 2).



**Рис. 2.** Схематическая геологическая карта района исследований с элементами металлогении (масштаб 1:500000). Примечание: карта составлена по геологической карте масштаба 1:200000 на основе государственных листов М-50-V, М-50-VI [12]. Уровни заболеваемости приведены по [4]

**Fig. 2.** Schematic geological map of the investigation area with the metallogenic aspects (map scale 1:500000). Note: the map is based on the geological map (map scale 1:200000, national chart sheets M-50-V, M-50-VI [12]. Incidence rates are given after [4])

Основные тектонические нарушения, среди которых главным является Пограничный разлом, имеют северо-восточное простирание. Многочисленные разрывные структуры других порядков разделяют район на геологические блоки.

В районе развиты интрузивные комплексы разного возраста и состава, в том числе имеющие ярко выраженные радиогеохимические особенности как U, так и Th природы. Рядом исследователей в пределах данной территории выделен Урюмкано-Уровский радио-экологический район с особой обстановкой.

В металлогеническом плане район исследования входит в Агинскую металлогеническую провинцию [12] с проявлением разнообразных и разномасштабных месторождений и рудопроявлений (от крупнейшего в мире Стрельцовского урановорудного узла на юго-востоке до Быстринского и Новоширокинского рудных полей на северо-западе). Непосредственно в районе выделяется Мотогорский Sn-U-F рудный узел с проявлениями Th, Zn, Cu, Mo, Pb, As, Bi, Au, Hg и других металлических и неметаллических видов полезных ископаемых, в том числе минеральных вод с Rn (Ямкун, Солонешное и другие). В пределах района по данным радиогеохимического картирования широко развиты водные источники Rn, Rn-U, Rn-Ra, U природы.

Всё это позволяет предположить, что геологические, ландшафтно-геоморфологические, гидрогеологические, геохимические и другие факторы либо их сочетанное (синергетическое) воздействие в целом

могут быть одной из причин развития болезни Кашина–Бека.

#### Проблема этиологии болезни Кашина–Бека

На территории нынешнего Забайкальского края в разные годы проводились исследования данного заболевания, в том числе с использованием рентгенодиагностики (1930–1932 гг. – Н.И. Дамперов, 1940–1945 гг. – Ф.П. Сергиевский, 1951–1958 гг. – Л.Ф. Кравченко, 1978–1993 гг. – А.В. Вощенко и другие), которые в большинстве случаев отмечали тенденцию к уменьшению уровня заболеваемости БКБ. По результатам исследований была составлена карта распространения болезни в Восточном Забайкалье, разработана классификация поражений организма при болезни, предложена P-Mn модель заболевания, сформулированы методические рекомендации по лечению болезни, создан музей с коллекцией препаратов и скелетов больных.

Согласно официальным данным, начиная с 1987 г., новых случаев заболевания в Забайкальском крае не отмечено. Хотя, по мнению И.В. Холмогоровой, главного врача ГУЗ «Краевой центр медицинской реабилитации Ямкун» (устное сообщение, 2017 г.), пациенты с симптомами БКБ появляются.

Причины возникновения заболевания изучаются специалистами уже более 170 лет, что привело к существованию более чем 20 гипотез, ведущими из них являются биогеохимические и микробиологические (табл. 1).

**Таблица 1.** Список теорий по этиологии болезни Кашина–Бека и их авторы

**Table 1.** List of theories on Kashin–Beck disease etiology and their authors

Теория/Theory	Авторы/Authors
заболоченность и ржавость воды water marshiness and rustiness	И.А. Юренский, Н.И. Кашин I.A. Yurenskiy, N.I. Kashin
растворенные в воде минералы, в том числе коллоидное Au minerals dissolved in water, including colloidal Au	Е.В. Бек, Н.Л. Сакович, В.Г. Шипачев E.V. Beck, N.L. Sakovich, V.G. Shipachev
радиоактивность воды water radioactivity	И.А. Багашев I.A. Bagashev
алиментарно-токсическая alimentary-toxic	Ф.П. Сергиевский, Л.Ф. Кравченко F.P. Sergievskiy, L.F. Kravchenko
дефицит Ca и избыток P (Ca-P) Ca deficiency and P abundance (Ca-P)	А.П. Виноградов, П.Н. Палей A.P. Vinogradov, P.N. Paley
дефицит Ca и избыток Sr (Ca-Sr) Ca deficiency and Sr abundance (Ca-Sr)	В.В. Ковальский, В.В. Ермаков, И.А. Самарина, В.Г. Хоботьев, В.С. Бутко V.V. Kovalskiy, V.V. Ermakov, I.A. Samarina, V.G. Khobotev, V.S. Butko
избыток P и Mn P and Mn abundance	А.В. Вощенко, Л.В. Зайко, Н.Н. Алексенцева A.V. Voschenko, L.V. Zayko, N.N. Aleksentseva
дефицит Se/Se deficiency	китайские ученые, Л.В. Аникина, Л.П. Никитина Chinese scientists, L.V. Anikina, L.P. Nikitina

Еще начиная с работ А.П. Виноградова в качестве индикаторных показателей для выделения неблагополучных по болезни БКБ территорий использовались отношения химических элементов. Самыми распространенными индикаторными отношениями, согласно литературным данным, являются Ca/Sr, Ca/P, Ca/Mn, P/Mn. Данные отношения наиболее часто используются в исследованиях, посвященных району распространения БКБ, в том числе и на территории Китая, где в настоящее время находится мировой центр изучения болезни Кашина–Бека.

Именно китайскими исследователями была предложена приоритетная на настоящий момент теория, объясняющая происхождение заболевания, – дефицит

Se (гипоселеноз) в окружающей среде и его биодоступности [13–16]. Рядом российских исследователей данная точка зрения также переносится и на территорию Забайкальского края [17].

#### Материалы и методы исследования

С целью выявления геохимической специализации компонентов природной среды в районе проявления болезни Кашина–Бека авторы статьи провели комплексные исследования в населенных пунктах (н.п.), в которых 70–80 лет назад фиксировались повышенные уровни заболеваемости (Тайна, Уровские Ключи), и населенных пунктах, где болезнь не была выявлена (Калга). Дополни-

тельно были отобраны пробы некоторых компонентов природной среды в других населенных пунктах (рис. 1).

Каждый из отобранных компонентов природной среды обладает своими особенностями накопления

химических элементов, временем депонирования и индикаторными свойствами. Для исследования отбирался материал, представленный как косным, так и живым веществом биосферы (табл. 2).

**Таблица 2.** Компоненты природной среды, изученные в данном исследовании

**Table 2.** Environmental components investigated in the current study

Компонент природной среды Environmental component	Количество проб Number of samples	Количество химических элементов Number of chemical elements	Метод анализа Analytical method	
Почва/Soil	3	28	ИНАА/INAA	
Донные отложения/Bottom sediments	7	28		
Природные воды/Natural waters	8	62	ИСП-МС/ICP-MS	
Солевые отложения питьевых вод Drinking water salt sediments	6	28	ИНАА/INAA	
Картофель/Potato	4	28		
Керн годовых колец деревьев Core of tree rings	7	28		
Листья тополя/Poplar leaves	17	28		
Лишайник/Lichen	9	28		
Мох/Moss	7	28		
Польнь/Wormwood	9	28		
Волосы детей Children hair	5	28		
Кости свиньи домашней Bone of domestic pig	10	62		ИСП-МС/ICP-MS
		28		ИНАА/INAA
		62	ИСП-МС/ICP-MS	

*Примечание:* ИНАА – инструментальный нейтронно-активационный анализ, ИСП-МС – масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

*Note:* INAA – instrumental neutron activation analysis, ICP-MS – inductively coupled plasma mass-spectrometry

Элементный состав всех проб, кроме природных вод, был определен методом ИНАА в ядерно-геохимической лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра (МИНОЦ) «Урановая геология» на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т НИ ТПУ (аттестат аккредитации № RA.RU.21AB27 от 27.05.2015 г., аналитики – А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская). Было определено содержание 28 химических элементов (Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Th, U).

Пробы природных вод, волос детей и костей свиньи домашней были дополнительно проанализированы методом ИСП-МС в ООО «Химико-аналитический центр "Плазма"» (г. Томск, аттестат аккредитации № РОСС.RU.0001.516895 от 25.03.2014 г., директор – Н.В. Федюнина) и Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии ИШПР НИ ТПУ (зав. лабораторией – А.А. Хвощевская). Количество химических элементов, определенных данным методом, составило 62.

Полученные данные по содержанию химических элементов обрабатывались следующим образом: рассчитывались коэффициенты концентрации (КК) относительно кларка ноосферы [18], далее строились геохимические ряды, в которых особое внимание обращалось на значения  $КК > 1,5$ . Данные по природным водам нормировались к элементному составу воды оз. Байкал [19]. Были также рассчитаны индикаторные отношения, как широко обсуждаемые при рассмотрении проблемы БКБ (Ca/Sr, Ca/Mn, P/Mn, Ca/P), так и используемые нами (Ca/Ba, La/Yb, La/Th, Br/U, Th/U) при эколого-геохимическом мониторинге.

### Результаты и их обсуждение

Данная статья посвящена анализу показателей (коэффициенты концентрации, геохимические ряды, индикаторные отношения) для получения генерализованных выводов о сходстве и различии геохимических особенностей компонентов окружающей среды в районах проявления БКБ и вне таковых.

Почва является долговременной депонирующей средой и считается основным объектом эколого-геохимического мониторинга. Ее изучение требует определенного опыта, особенно интерпретации полученных данных, так как она может наследовать состав и геохимические особенности подстилающих пород (автохтонные) либо представлять собой перемещенный материал, имеющий мало связи с материнскими породами (аллохтонные) [20–24].

Для почв изученного района в силу специфики их формирования (климатические условия, сложный горный рельеф, многолетняя мерзлота и другие факторы) характерны некоторые черты, отличающие их от основных зональных почв. Мерзлотные лугово-лесные и лугово-черноземные почвы являются основным фондом сельскохозяйственных угодий региона, в том числе в районе, где проводился отбор проб.

Анализ некоторых геохимических особенностей почв показывает, что максимальное количество (17 из 26) химических элементов с  $КК > 1,5$  характерно для образцов из с. Уровские Ключи, минимальное (6 химических элементов) – с. Тайна. Повышенные (относительно кларка ноосферы) КК во всех пробах почв выявлены для Sr, и только в пробах из с. Тайна в геохимическом ряду присутствует Ca. Для почв района выявлена Ba-Sb-As-Zn специализация, к которой в населенных пунктах Уровские Ключи и Калга добав-

ляется Au. Данная геохимическая специализация, вероятнее всего, связана с наличием двух крупных рудных узлов Au-полиметаллического (Широкинский) и Cu-Мо-порфирового (Быстринский) типов. Также необходимо отметить присутствие U в геохимических рядах в пробах из сел Уровские Ключи и Калга (КК – 1,8 и 3,4, соответственно).

Значения рассчитанных индикаторных отношений некоторых химических элементов достаточно дифференцированы. Так, минимальное (69) значение отношения Ca/Sr зафиксировано в с. Калга, максимальное (107) – в с. Тайна. Примерно такие же значения данного отношения приведены в работе Н.Н. Алексенцевой [25]: от 180 в эндемичной зоне проявления БКБ до 142 в контрольном районе. Отношение Ca/Ba принимает максимальные значения в с. Уровские Ключи (31), а минимальные – в с. Тайна (15). Для почв с. Тайна также характерны минимальные значения отношений La/Yb (15), La/Th (2,5), Th/U (0,7). При этом для данного населенного пункта характерно максимальное значение отношения Vg/U (29,5), что выделяет с. Тайна по сравнению с другими изученными пунктами.

*Донные отложения* – сравнительно редкий компонент природной среды в эколого-геохимических исследованиях [26–28]. Однако в нашей работе они имеют важное значение при рассмотрении геохимических особенностей бассейнов местных рек.

Анализ геохимических особенностей донных отложений района распространения БКБ указывает, прежде всего, на золоторудную специализацию региона. Для четырех изученных водотоков характерна тесная ассоциация Au-Sb-As-Ba, разница наблюдается лишь в положении данной группы химических элементов в геохимических рядах. Только лишь в донных отложениях из р. Анчор (с. Калга) в геохимических рядах отсутствуют As и Ba, в пределах данного населенного пункта за все время наблюдений за БКБ не фиксировалось или редко фиксировалось данное заболевание. В свою очередь, для донных отложений р. Тайна характерны низкие концентрации Th и U (КК<1,5).

При анализе индикаторных отношений необходимо обратить внимание на их минимальные значения в донных отложениях р. Анчор, за исключением Vg/U (9,9), и максимальные значения в образцах из р. Тайна.

*Природные воды.* Поверхностные водотоки, которые до середины XX в. использовались как источники водоснабжения, и подземные воды в районе исследования изучаются давно (работы И.А. Багашева, А.П. Виноградова, Л.В. Зайко, В.Г. Хоботьева, В.Г. Шипачева, Л.К. Магнушевского, Н.Н. Алексенцевой, Л.В. Заманы и многих других ученых).

Так, в работе [29] показано, что на территории исследуемого района подземные и поверхностные воды пресные, преимущественно гидрокарбонатные, дву- или трехкомпонентные по катионам с преобладанием Ca. Заметно различаются химические характеристики вод в зависимости от приуроченности к геологическим комплексам и ландшафтными зонам. Наиболее контрастные гидрогеохимические аномалии связаны

с карбонатными породами быстринской свиты и вулканогенными породами гидаринской и годымбойской свит. Минерализация приуроченных к ним вод составляет в среднем 570, 208, 248 мг/л, соответственно; содержание Ca – 73, 27,5, 28,2 мг/л; Sr – 0,37, 0,22, 0,21 мг/л; P<sub>общ</sub> – 0,047, 0,134, 0,118 мг/л [29]. Как видно, содержание Ca в водах, приуроченных к карбонатным породам, в 2,5 раза выше, чем в водах, приуроченных к эффузивным породам. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований А.П. Виноградова, согласно которым заболевание не проявляется на участках распространения карбонатных пород, несмотря на более высокое содержание Sr в водах. Данные по Ca и Sr в природных водах, в том числе по отдельным водоносным горизонтам, также хорошо согласуются с выводами А.П. Виноградова [30]. Содержание P в целом подтверждают выводы авторов Р-Мп гипотезы [31]: аномалии связаны не только с болотными ландшафтами, но и водами, развитыми по вулканогенным породам. Так, максимальное содержание P (3,46 мг/л) выявлено в роднике, дренирующем базальты годымбойской свиты на суходольном участке без многолетней мерзлоты. Отношение Ca/P в очагах БКБ в большинстве случаев меньше 300.

В гидрогеохимическом плане аномалии P вызывают интерес даже вне связи с БКБ. По данным изучения более чем 550 проб к аномальным отнесены пробы с содержанием общего P более 0,1 мг/л. Кроме того, в этих же пробах определялось содержание органического P. Согласно результатам, в пробах с фоновым содержанием P на его органическую форму приходится около 50 %, в то время как в аномалиях преобладает минеральная форма. Расчет равновесия в пробах вод с высоким содержанием P показывает насыщение по апатиту, что ставит вопрос о форме нахождения этого химического элемента в горных породах (чаще всего, это апатит). Вероятно, насыщение по апатиту в водах достигается в результате образования полифосфатной формы, наличие которой было выявлено единичными определениями, в том числе и по данным Н.Н. Алексенцевой [25].

В свою очередь, аномалий по Mn не выявлено, также в аномальных по P водах выявлены повышенные содержания Si. Среди тяжелых металлов в водах данного района выделяются Cu, Mo, Pb: по последнему элементу выделяется участок в пределах левобережья р. Уров в поле развития базальтов годымбойской свиты, где содержание Pb достигает 27 мкг/л (ПДК для питьевых вод – 30 мкг/л). Повышенные концентрации данных элементов также установлены в костях больных БКБ [32, 33].

При анализе геохимических рядов коэффициентов концентрации (относительно воды оз. Байкал) для подземных вод выделяется проба из с. Тайна, в которой отмечено максимальное количество элементов с КК>1,5 – 24, среди которых Tl, Ge, Li, Pb, Cu, Sb, W и другие. В пробах из с. Калга отмечены высокие КК для Hg (773) и U (35).

Отношение Ca/Sr колеблется от 87 (с. Калга) до 481 (с. Уровские Ключи), отношение Ca/Ba варьирует в пределах от 974 (с. Тайна) до 3157 (с. Уровские

Ключи). Весьма интересно распределение показателя Ca/Mn: минимальное значение отмечается в с. Тайна (1732), максимальное – в с. Калга (4862).

Геохимические ряды для поверхностных вод показывают, что максимальное количество химических элементов с  $KK > 1,5$  зафиксировано в пробе из р. Газимур (30), в том числе Ti, Zr, Sm, Gd, Th, что значительно отличается от других водотоков района. Вероятно, это отражает особенности геологического строения бассейна реки, в пределах которого распространены гранитоиды. Для пробы из р. Тайна отмечено присутствие 28 химических элементов, в том числе As ( $KK = 21$ ), в образцах р. Уров отмечено 16 элементов, практически без каких-либо специфических компонентов. Специфические компоненты также отсутствуют в воде р. Анчор. В этом плане весьма интересно смотрится Ямкун – поверхностный водоем озерного типа со слабой рассеянной нагрузкой, описанный нами ранее [34]. В этом водоеме отмечено 12 химических элементов, таких как Be, Cs, Tl, Y, W, свидетельствующих о происхождении, которое, вероятно, связано с щелочными гранитоидами. По Ca, Sr, Mn изученные поверхностные водотоки мало отличаются, за исключением оз. Ямкун.

Отношение Ca/Sr колеблется от 91 (р. Газимур) до 205 (оз. Ямкун); Ca/Ba – от 1177–1178 (р. Газимур, оз. Ямкун) до 2089 (р. Анчор), в р. Уров оно составляет 1620.

*Солевые отложения питьевых вод (накипь)*, образующиеся в бытовых условиях после кипячения, являются новым компонентом в эколого-геохимических исследованиях, который обладает достаточно большой информативностью. Геохимические особенности данных образований отражают состав питьевой воды и в общем случае являются индикатором ее качества [35, 36].

Анализ полученных данных показывает, что в накипи накапливается небольшое количество химических элементов (6–7) с  $KK > 1,5$ . К ним относятся Ca и Sr ( $KK > 10$ ), которые есть во всех пробах, кроме проб из с. Нерчинский Завод. Естественно, что отношение Ca/Sr в данном населенном пункте максимально (1076), в свою очередь минимальное отношение отмечается в пробах из г. Борзя (137). Обращает на себя внимание, что во всех изученных населенных пунктах в геохимических рядах присутствует U ( $KK > 1,5$ ). Как и в случае с почвой, в накипи выделяется группа химических элементов Au-полиметаллической ассоциации (Zn, Au, Ba), в 4 населенных пунктах добавляется Sb, в одном случае (г. Борзя) – As. Лишь в пробах из с. Уровские Ключи в геохимическом ряду нет Sb и As.

Отношение Ca/Ba в накипи колеблется от 1714 (с. Тайна) до 24615 (с. Ямкун), отношения La/Yb и La/Th весьма контрастны – минимальные значения составляют 1,5 и 2,3 (оба – с. Нерчинский Завод), максимальные – 532 (с. Ямкун) и 798 (с. Калга), соответственно. Vg/U отношения характеризуются значениями от 0,003 до 1, при этом наименьшее значение отмечено в с. Калга. По величине Th/U отношения солевые образования питьевых вод имеют ярко выра-

женную урановую природу: во всех случаях оно значительно меньше 1, минимума оно достигает в пробах с. Ямкун (0,00002).

*Листья тополя* являются природным геохимическим планшетом, который начинает активно использоваться в эколого-геохимических исследованиях [37–39]. Несмотря на короткий период (май–сентябрь) депонирования загрязняющих веществ, они являются хорошим материалом для исследования. В них накапливаются 5–7 химических элементов (с  $KK > 1,5$ ), указывающих, прежде всего, на биогеохимическую специфику самих листьев (Zn) и металлогеническую специализацию региона (Ba, Sb, As) за исключением Au, которое не успевает накапливаться за короткий вегетационный период. Ca и Sr накапливаются в вышескларковых содержаниях во всех населенных пунктах, кроме с. Нерчинский Завод. Из других особенностей стоит отметить накопление Rb в пробе из с. Ямкун, редких и редкоземельных элементов – в с. Газимурский Завод. Данные особенности подчеркивают гипотезу о петрогенной природе данных элементов.

Что касается индикаторных отношений, то отношение Ca/Sr колеблется в интервале от 108 (с. Газимурский Завод) до 2206 (с. Нерчинский Завод), значение Ca/Ba отношения – от 524 (с. Газимурский Завод) до 2068 (с. Горный Зерентуй). Отношение La/Yb слабо дифференцировано: от 8,7 (с. Тайна) до 32 (с. Ямкун). Такими же интервалами характеризуется Vg/U отношение – от 4,1 до 39. La/Th отношение также слабо дифференцировано (от 2,9 до 4,5). В большинстве населенных пунктов величина Th/U отношения меньше 1, только в с. Газимурский Завод оно существенно выше 1 – 3,9.

*Годовые кольца деревьев* являются индикатором поступления химических элементов во время роста дерева [40, 41], что позволяет использовать их в эколого-геохимических исследованиях [42, 43]. В данном исследовании нам было важно оценить уровни накопления химических элементов во временном интервале и провести сравнительный анализ с другими районами (Горный Алтай). В данном случае мы обсуждаем геохимические особенности дерева (лиственница) по совокупности годовых колец, входящих в один временной срез.

Сравнение кларков концентраций химических элементов в годовых кольцах лиственницы, произрастающих в регионах, различных в геологическом отношении (Алтай, Забайкалье), показывает, что пробы с Алтая обогащены Vg, As и Co, а для проб из Забайкалья характерна Au-Ba-Sr специализация ( $KK > 50$ ). Также существенно накопление Ca ( $KK = 10$ ). В распределении Ca, Fe, Zn, Vg, Nd отмечается некоторая цикличность: так, в годовых кольцах (1946–1969 гг., 2000–2017 гг.) содержания этих элементов максимальны, в то время как в пробах с 1970 по 1999 гг. уровни накопления меньше. При этом Ca/Sr изменяется от 25 (1946 г.) до 48 (2017 г.). Этот факт связан, возможно, с фазами атмосферного увлажнения, что требует дальнейших исследований и отдельного анализа.

При рассмотрении индикаторных отношений необходимо отметить близкие значения Ca/Sr отношения в лиственнице из населенных пунктов Забайкалья, тогда как Ca/Ba отношение дифференцировано: минимальное значение отмечено в пробе из с. Тайна (37). Отношения La/Yb, La/Th, Br/U минимальны в с. Уровские Ключи – 2, 0,7 и 17, соответственно. Th/U отношение во всех случаях меньше 1.

Лишайники являются количественными индикаторами состояния окружающей среды, поскольку получают влагу из осадков или атмосферы, используя осмотическое давление. Это значит, что они поглощают все вещества из окружающей среды, не обладая механизмами освобождения от них [3, 44, 45]. В процессе выполнения работ нами производился отбор двух видов эпифитных лишайников: *Evernia prunastri* (L.) Ach. (1810) и *Flavoparmelia caperata* (*Lobaria caperata*) (L.) Hoffm. (1796).

Анализ геохимических особенностей этих видов позволяет сделать вывод, что оба вида обладают близкими концентрационными способностями и в дальнейшем рассматриваются нами без разделения.

Для лишайников изученных районов характерен низкий уровень концентрирования химических элементов относительно кларка ноосферы. Так, в геохимических рядах проб из с. Уровские Ключи и Калга отмечается только 1 элемент с  $KK > 1,5$  – Au. Максимальное количество (6) выявлено в образцах из с. Тайна с Ba-Sb-As-Zn ассоциацией Au-полиметаллических месторождений. Такая же ассоциация выделена в с. Горный Зерентуй, вблизи которого с XVIII в. разрабатывалось Ag-полиметаллическое месторождение. При этом концентрация Ag в лишайниках оказалась ниже 0,3 г/т.

Максимальные значения Ca/Sr (446) и Ca/Ba (586) отношений установлены в пробах из с. Уровские Ключи, минимальные – в с. Тайна, 111 и 56, соответственно. Весьма интересно распределение La/Yb отношения: оно минимально в с. Тайна – 9, максимально в с. Калга – 58, в других населенных пунктах оно колеблется незначительно (от 11 до 15). Разброс значений La/Yb отношений составляет от 2,5 (с. Тайна) до 13 (с. Калга). Br/U отношение также максимально в пробах из с. Калга (8,7), при этом минимальное значение отмечено в с. Ямкун (2). В двух из пяти населенных пунктов отношение Th/U выше 1 и достигает 1,9 в с. Тайна, минимальное отношение отмечено в с. Калга (0,1).

Мхи различных видов активно используются при биогеохимических поисках месторождений полезных ископаемых и в комплексном экологическом мониторинге. Данные по содержанию химических элементов во мхах отражают интегральное осаждение и накопление из воздуха и атмосферных осадков [3, 44, 45]. Для данного исследования был выбран мох кукушкин лен, или политрих обыкновенный (*Polytrichum commune*).

Геохимические особенности показывают, что пробы мха во всех шести изученных населенных пунктах характеризуются различными геохимическими рядами. Максимальное количество химических элементов с  $KK > 1,5$  отмечено в пробе из с. Ямкун, где отчетливо

выделяется Au-Ab-As-Sb ассоциация, характерная для данного района. Кроме того, только для этого населенного пункта в геохимическом ряду присутствует U. В других населенных пунктах к основной ассоциации в геохимических рядах добавляется Zn (с. Тайна, Горный Зерентуй). Минимальное количество (3) химических элементов с  $KK > 1,5$  отмечено в с. Уровские Ключи и Калга. Sr с  $KK > 1,5$  выявлен в пробах из с. Калга и Ямкун. Са в геохимических рядах нигде не зафиксирован.

Индикаторные отношения показывают разнонаправленную динамику. Ca/Sr отношение максимально в с. Тайна (224), минимально в с. Калга (13), при этом в других населенных пунктах эти показатели близки (от 106 до 132). Аналогичную картину проявляет отношение Ca/Ba: максимум (89) и минимум (29) отмечен в тех же населенных пунктах. Отношения La/Yb, La/Th, Br/U и Th/U слабо дифференцированы: низкие значения La/Yb отношения выявлены в с. Горный Зерентуй и Ямкун – 11 и 12, соответственно, при этом высокие значения данного показателя в с. Калга (18). La/Th отношение минимально в с. Калга (2,7) и максимально в с. Уровские Ключи (4). Минимальные значения Br/U и Th/U отношений отмечены в с. Ямкун (0,7 и 0,3, соответственно), а максимальные – в с. Калга (3,4 и 2, соответственно).

*Польнь горькая* (*Artemisia absinthium*) достаточно редкий объект для использования в эколого-геохимических исследованиях, при этом обычно изучается наземная и корневая часть по отдельности [46, 47]. На этапе отбора проб мы следовали этой же практике, однако после получения аналитических данных отказались от рассмотрения результатов по надземной части, поскольку в ней происходит концентрирование незначительного спектра химических элементов. Для сравнения, в надземной части накапливается от 1 до 5 химических элементов с  $KK > 1,5$ , в то время как в корневой части отмечается от 10 до 19.

Особое внимание обращает на себя проба из с. Тайна, где в геохимическом ряду зафиксировано 19 из 25 изученных элементов, в том числе Ba-Sb-As-Au-Zn ассоциация, характерная для региона и выявляемая практически во всех изученных компонентах. Из интересного также необходимо отметить следующие особенности: 1) накопление Br в надземной части растения по сравнению с корневой в пробах из н.п. Тайна, Уровские Ключи, Ямкун; 2) накопление Ag в надземной части образцов из с. Горный Зерентуй, что не согласуется с предположением о его концентрировании в корневой части в районе расположения Ag-полиметаллического рудного поля; 3) активное концентрирование редкоземельных элементов, Th и U в ряде проб. Са и Sr в некоторых пробах присутствуют в вышекларковых значениях.

Отношения химических элементов ведут себя разнонаправленно. Максимальные амплитуды отмечены для Ca/Sr и Ca/Ba: первый показатель варьирует от 33 (с. Нерчинский Завод) до 475 (с. Горный Зерентуй), второй – от 14 (с. Тайна) до 94 (с. Шелопугино). В то время как отношения La/Yb, La/Th, Br/U и Th/U слабо дифференцированы: La/Yb – от 10 (с. Ямкун) до 17



(с. Нерчинский Завод), La/Th – от 2,8 (с. Шелопугино) до 3,4 (с. Уровские Ключи, Горный Зерентуй), Вг/U – от 0,4 (с. Горный Зерентуй) до 6,9 (с. Ямкун), Th/U – от 0,9 (с. Ямкун) до 3 (с. Горный Зерентуй).

*Картофель* не является первоочередным объектом при проведении эколого-геохимических исследований, однако в случае, когда необходимо оценить воздействие геохимического фактора на человека, изучение качества продуктов питания, в частности, картофеля, является хорошим способом получения информации о поступлении химических элементов в организм [48, 49].

Анализ данных показывает, что в силу специфики своего развития (короткий период вегетации) в клубнях картофеля накапливается небольшой (3–4) спектр химических элементов с  $KK > 1,5$ . Выделяется сокращенная ассоциация Au-Zn, к которой иногда добавляется Ba (с. Калга). Во всех населенных пунктах в геохимическом ряду отмечается Sr при отсутствии Ca. В пробе из с. Тайна появляется Rb.

При изучении индикаторных отношений обращает на себя внимание следующий факт: 4 из 6 показателей (Ca/Sr – 104, Ca/Ba – 469, La/Th – 11, Вг/U – 28) принимают максимальное значение в пробах из с. Тайна, в то время как два других показателя (La/Yb – 3,1, Th/U – 0,02) характеризуются минимальными значениями. Согласно литературным данным, уровень заболеваемости БКБ в данном населенном пункте составлял до 38 %. Обратная картина наблюдается для с. Калга, которое считается фоновым по уровню заболеваемости БКБ.

*Волосы детей* за последние десятилетия стали объектом эколого-геохимического мониторинга, по их элементному составу накопилось большое количество данных. На сегодняшний день по Забайкальскому краю имеется значительный объем информации [50].

Анализ КК относительно регионального фона показывает, что максимальное накопление наблюдается в с. Калга (Na, Sc, Cr, Fe, Zn, Br, Rb, Sb, Eu, Tb, U), в с. Тайна концентрируются Na, Ca, Вг, Rb, Ag, Cs, Ba, Та, в с. Уровские Ключи – Na, As, Sb, Rb, Ag, Та, в с. Нерчинский Завод – только Ag. Содержание Sr во всех пробах из данных населенных пунктов ниже регионального фона.

Геохимический ряд химических элементов, определенных методом ИСП-МС, выглядит урезано: в волосах накапливается от 2 (с. Калга) до 5 (с. Уровские Ключи, Тайна, Нерчинский Завод) элементов с  $KK > 1,5$ , преимущественным элементом является Вi, который в других изученных компонентах ранее не встречался. При этом необходимо отметить, что повышенное содержание Вi отмечалось и в населенных пунктах, подверженных БКБ в Китае [51]. Во всех населенных пунктах отмечается Zn, в н.п. Тайна и Уровские Ключи – Cd, в с. Нерчинский Завод и Уровские Ключи – Se. Для волос из с. Калга отмечено избыточное количество Au. Полученные данные для ряда химических элементов коррелируют с данными по Китаю [52].

В связи с тем, что волосы были проанализированы методом ИСП-МС, спектр отношений химических элементов был расширен за счет Ca/Mn, P/Mn и Ca/P, которые в научной литературе рассматриваются как индикаторные для районов проявления БКБ. Максимальные значения отношений Ca/Sr (355), Ca/Ba (384) и Ca/Mn (227) отмечены в пробах из с. Тайна, минимальные значения наблюдаются в образцах из с. Уровские Ключи (71 и 70, соответственно). Самые высокие (9,6) и низкие (0,8) показатели Ca/P отношения зафиксированы в н.п. Тайна и Уровские Ключи, соответственно, которые характеризуются как территории проявления БКБ. La/Yb колеблется от 1,8 (с. Нерчинский Завод) до 6,1 (с. Тайна), La/Th – от 0,9 (с. Калга, Нерчинский Завод) до 5,1 (с. Уровские Ключи), Вг/U – от 15 (с. Калга) до 128 (с. Тайна), Th/U – от 0,02 (н.п. Калга и Нерчинский Завод) до 0,08 (с. Уровские Ключи).

*Кость свиньи домашней* – новый объект, который может быть использован в эколого-геохимических исследованиях, поскольку организм свиньи домашней (*Sus scrofa domestica*) наиболее близок к организму человека по физиологическим параметрам и особенностям питания. Ранее проведенные нами исследования показали практически полное совпадение элементного состава органов и тканей организма данного вида и организма человека на одной территории [53]. Поэтому использование данного вида в качестве модельного может служить достаточно надежным индикатором при оценке воздействия факторов окружающей среды на организм человека [53–55], что особенно актуально при изучении эндемических болезней, таких как БКБ. Следует отметить, что при анализе литературы по особенностям проявления БКБ часто обращалось внимание на высокую ломкость костей у животных [56, 57 и др.]. В нашем исследовании были изучены пробы берцовой кости свиньи, которые были отобраны у местного населения. При подготовке к аналитическим исследованиям одной из проб, взятой в с. Уровские Ключи, обнаружился физический дефект кортикальной части с ярко выраженной секвестральной полостью (25\*10 мм), краевые части которой были сложены истонченной тканью с легко отделяющимися осколками (рис. 3). В данном случае для изучения было подготовлено 2 пробы: первая – из малой берцовой кости, вторая была представлена осколками из секвестральной полости большой берцовой кости.

Из геохимических особенностей стоит отметить следующее: максимальные концентрации 36 из 66 определенных методом ИСП-МС химических элементов зафиксировано в пробе из с. Калга – населенном пункте, где БКБ практически не фиксировалась, в список этих элементов входят Li, Zn, Ge, Cd, Nd, W, Hg, Tl, Bi, Th, U; максимальные содержания 12 химических элементов отмечены в образце из с. Газимурский Завод, в том числе Na, P, K, Ca, Cr, As, Sb, Te, Ba, Au, Pb. В свою очередь в пробе из с. Уровские Ключи наибольшие концентрации выявлены только для Ag (в малой берцовой кости), Ru, In, Re (в патологически измененной большой берцовой кости).

Анализ геохимических рядов относительно кларка ноосферы показывает, что Р занимает ведущую позицию в ряду во всех населенных пунктах, что объясняется составом кости – матричная основа состоит из Са (от 20,5 % в условной здоровой кости из с. Уровские Ключи до 26 % в образце из с. Газимурский Завод) и Р (от 10,3 % в условной здоровой кости из с. Уровские Ключи до 12,9 % в пробе из с. Тайна). As и Au также занимают ведущие позиции в геохимических рядах, при этом в патологически измененной кости в ряду отсутствует As. Во всех геохимических рядах также присутствуют Sr и Zn, что, вероятно, указывает на их роль как компонента костной ткани. Из других интересных особенностей стоит отметить наличие Bi (кроме с. Тайна), Hg (кроме патологически измененной кости), Cг (только в с. Калга). В свою очередь, лишь в патологически измененной кости отмечено накопление Re (КК – 17).



**Рис. 3.** Секвестральная полость на большой берцовой кости свиньи домашней, с. Уровские Ключи (сентябрь 2017 г.)

**Fig. 3.** Sequestral cavity in tibia of domestic pig, Urovskie Klyuchi village (September, 2017)

Индикаторные отношения также дают интересную информацию. Отношение Са/Sr варьирует от 669 (с. Калга) до 2268 (с. Тайна), при этом данный показатель в условно здоровой и патологически измененной кости примерно одинаков (1147 и 1314, соответственно). Интервал Са/Ва отношения составляет от 8142 (с. Калга) до 20787 (с. Тайна), данные по условно здоровой и патологически измененной кости также примерно схожи (15866 и 15007). Для Са/Mn и Р/Mn минимальное значение установлено также в пробе из с. Калга (9917 и 4165), а вот максимальное отмечено в патологически измененной кости из с. Уровские Ключи (169928 и 76982), в то время как в условной здоровой данные показатели составляют 18305 и 9321. Важный в целом для кости параметр Са/Р изменяется в узком интервале (2,0–2,2), что близко к данным по зольному остатку организма человека [58, 59]. Остальные отношения также показывают разнонаправленную динамику: La/Yb – от 3 (патологически измененная кость) и 13 (условно здоровая кость) в с. Уровские Ключи до 63 (с. Газимурский Завод);

La/Th – от 1,7 (патологически измененная кость в с. Уровские Ключи) до 3,1 (с. Тайна); Br/U – от 0,8 (условно здоровая кость) и 1,2 (патологически измененная кость и проба из с. Тайна) до 5 (с. Газимурский Завод); Th/U изменяется в незначительных пределах (1,5–3,1), при этом наиболее контрастно данный показатель смотрится при сравнении условно здоровой (Th/U – 3,0) и патологически измененной (Th/U – 0,3) костей.

В целом, как показывают полученные данные, кость свиньи домашней может выступать интересным индикатором при сравнительном геохимическом анализе различных населенных пунктов, особенно с проявлениями заболеваний опорно-двигательного аппарата.

Проведенный анализ геохимических особенностей компонентов природной среды в районе проявления БКБ показывает их разнообразие как по уровням накопления химических элементов, так и по отношению химических элементов в различных населенных пунктах. Нами предпринята попытка определить геохимическую специализацию компонента природной среды в зависимости от места отбора для трех населенных пунктов, где были отобраны все изучаемые компоненты: Калга, Тайна, Уровские Ключи. Компоненты были проранжированы по сумме мест, занимаемой по геохимическим показателям (от 4 до 10) в каждом населенном пункте. Чем меньше сумма, тем чаще населенный пункт занимает первые места по рассчитанным показателям (максимальное количество химических элементов с  $КК > 1,5$ ; максимальные значения индикаторных отношений). В результате был получен следующий ряд: с. Тайна (средняя сумма мест – 1,7) – с. Уровские Ключи (2,0) – с. Калга (2,2) (табл. 3).

Как показывает анализ данных табл. 3, именно в с. Тайна выявлено наибольшее количество показателей с максимальными значениями. Следует отметить, что по литературным данным в данном населенном пункте уровень заболеваемости БКБ составлял 30,4 % [31]. Калга во всех источниках рассматривается как населенный пункт, благоприятный по БКБ [4 и др.], при этом средняя сумма ранжированных показателей максимальна среди рассматриваемых населенных пунктов. Несмотря на то, что Уровские Ключи находятся в эпицентре распространения БКБ, в нем не фиксировалось значимого проявления заболевания, что связано с расположением села в поле развития карбонатных пород кембрийского возраста [30, 60–62], как результат в почве, воде и других средах наблюдается избыток Са. Это подтверждается и нашими данными.

Полученные данные свидетельствуют о том, что БКБ полиэтиологична: большую роль играют природные условия (низкие температуры, развитие мерзлотных лугово-болотных ландшафтов), это подтверждается последними данными китайских ученых [63]. В основе болезни лежит несбалансированность элементарного состава компонентов природной среды, как следствие, дисбаланс в химическом составе продуктов питания, питьевой воды, что приводит к недостатку/избытку химических элементов в организме местных жителей. Индикаторы биогеохимической

природы БКБ остаются дискуссионными. Возникновение болезни нельзя связывать только лишь с одним химическим элементом, видимо, в данном случае проявляется синергетический эффект [64–67].

**Таблица 3.** Геохимические особенности компонентов природной среды в исследованных населенных пунктах

**Table 3.** Geochemical features of the environmental components in the investigated settlements

Компонент природной среды Environmental component	Населенные пункты/Settlements		
	Тайна/Taina	Уровские Ключи/Urovskie Klyuchi	Калга/Kalga
Почва/Soil	Ca/Sr, Br/U	N, Ca/Ba, La/Yb, Th/U	La/Th
Донные отложения Bottom sediments	Ca/Sr, Ca/Ba, La/Yb, La/Th	Ca/Mn	N, Th/U
Подземные воды Underground waters	N	Ca/Sr, Ca/Ba	Ca/Mn
Поверхностные воды Surface waters	N		Ca/Sr, Ca/Ba, Ca/Mn
Солевые отложения питьевых вод Drinking water salt sediments	N, La/Yb, Br/U, Th/U	Ca/Sr, Ca/Ba	N, La/Th
Керн годовых колец деревьев Core of tree rings	N, La/Yb, La/Th, Br/U	Ca/Sr, Ca/Ba, Th/U	
Листья тополя/Poplar leaves	N	Ca/Sr, Ca/Ba, La/Th	La/Yb, La/Th, Br/U, Th/U
Лишайник/Lichen	N, Th/U	Ca/Sr, Ca/Ba	La/Yb, La/Th, Br/U
Мох/Moss	N, Ca/Sr, Ca/Ba	La/Th	La/Yb, Br/U, Th/U
Польнь/Wormwood	N, Br/U, Th/U	Ca/Sr, Ca/Ba, La/Yb, La/Th	
Картофель/Potato	N, Ca/Sr, Ca/Ba, La/Th, Br/U	La/Yb, Th/U	N
Волосы детей/Children's hair	N, Ca/Sr, Ca/Ba, La/Yb, Br/U, Ca/Mn, Ca/P	N, P/Mn, La/Th, Th/U	
Кости свиньи домашней Bone of domestic pig	Ca/Sr, Ca/Ba, La/Th, Ca/Mn, Ca/P, P/Mn	Br/U, Th/U	

*Примечание:* N – максимальное количество химических элементов с коэффициентом концентрации больше 1,5; в таблице отражены индикаторные отношения, значения которых максимальны в определенном населенном пункте.

*Note:* N – maximum list of chemical elements with concentration coefficient more than 1,5; in the table we represent indicative ratios that take the leading positions in a given settlement.

### Заключение

Район распространения БКБ в Забайкальском крае расположен в весьма сложном по геологическим и металлогеническим особенностям блоке земной коры, что приводит к формированию сложных геохимических обстановок и ассоциаций в компонентах природной среды. Вероятно, ландшафтно-геоморфологические, гидрогеологические, геохимические и некоторые другие факторы могут быть одной из причин развития БКБ. Нельзя отрицать и их сочетанное (синергетическое) воздействие.

Геохимические особенности изученных компонентов природной среды свидетельствуют, что многие из ранее высказанных геохимических гипотез (Ca/P, Ca/Sr, P/Mn, коллоидное золото, радиоактивность) находят то или иное подтверждение. В компонентах природной среды выделяется сквозная региональная геохимическая ассоциация (Zn-Pb-Ba-Sb-As-Bi-Au) с вариациями в зависимости от объекта исследования. Данная ассоциация отражает особенности общей металлогении района.

Для проведения исследований в данном районе наиболее информативными компонентами являются природные воды, костная ткань, волосы детей. Остальные компоненты могут быть выбраны по усмотрению исследователей. Среди геохимических

показателей должны оцениваться уровни накопления Ca, P, Mn, Sr, Ba, Br, U, Th, La, Yb. Для получения полной картины по F и Se необходимо применять более чувствительные аналитические методы.

Наиболее контрастная геохимическая специфика формируется в населенных пунктах, где по литературным данным наблюдались максимальные уровни заболеваемости БКБ. К таковым из изученных населенных пунктов относится с. Тайна.

В районе проявления БКБ на юго-востоке Забайкальского края формируется сложная геохимическая обстановка, обусловленная сочетанным воздействием ряда природных факторов. Необходимость оценки влияния (возможно, как положительного, так и отрицательного) данных факторов является научной и прикладной задачей ввиду активного горнопромышленного освоения территории проявления БКБ в Забайкальском крае.

*Научные исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров. Анализ проб методом ICP-MS выполнен при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-35-90061). Обработка данных и интерпретация результатов выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 20-64-47021).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / под ред. А.П. Соловова. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
2. Химический анализ в геологии и геохимии / под ред. Г.Н. Аюшина. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2016. – 622 с.

3. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов / Л.П. Рихванов, Н.А. Абросимова, Н.В. Барановская, Т.С. Большунова, Е.А. Горбатюк, А.В. Еделев, А.М. Межибор, И.Н. Мягкая, Б.Р. Соктоев, Д.В. Юсупов, Л.Н. Белан,

- С.Б. Бортникова, М.А. Густайтис, С.М. Жмодик, Н.В. Ишук, И.С. Кириченко, Д.В. Наркович, Е.В. Лазарева, В.В. Оленченко, О.П. Саева, Б.Ю. Саргы-оол, Т.В. Усманова, Н.В. Юркевич. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 437 с.
4. Дамперов Н.И. Карта распространения уровской болезни // Уровская болезнь в Забайкалье. – Иркутск, 1934. – С. 15–23.
  5. Хачумова К.Г., Лыткина К.А., Ильина Е.Ю. Болезнь Кашина-Бека: диагностика, дифференциальный диагноз // Вестник Российского государственного медицинского университета. – 2010. – № 6. – С. 15–19.
  6. Allander E. Kashin-Beck disease. An analysis of research and public health activities based on a bibliography 1849–1992 // *Scandinavian Journal of Rheumatology*. – 1994. – V. 23. – P. 1–36.
  7. Yamamuro T. Kashin-Beck disease: a historical overview // *International Orthopaedics*. – 2001. – V. 25. – P. 134–137.
  8. Stone R. A medical mystery in middle China // *Science*. – 2009. – V. 324. – P. 1378–1381.
  9. Big bone disease: a multidisciplinary approach of Kashin-Beck disease in Tibet Autonomous Region (P.R. China) / Eds. F. Malaisse, F. Mathieu. – Gembloux: Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2008. – 148 p.
  10. Иванова М.А., Иванова О.М. Новые медицинские технологии в исследовании болезней Кашина-Бека и ХОБЛ // Вестник новых медицинских технологий. – 2017. – Т. 24. – № 4. – С. 209–218.
  11. Endemic Kashin-Beck disease: A food-sourced osteoarthritis / K. Wang, J. Yu, H. Liu, Y. Liu, N. Liu, Y. Cao, X. Zhang, D. Sun // *Seminars in Arthritis and Rheumatism*. – 2020. – V. 50. – P. 366–372.
  12. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Лист М-50 – Борзя. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. – 553 с.
  13. Guo X., Ning Y., Wang X. Selenium and Kashin-Beck disease // *Selenium: chemistry, analysis, function and effects (food and nutritional components in focus)* / Ed. by V.R. Preedy. – Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2015. – P. 552–571.
  14. Du B., Zhou J., Zhou J. Selenium status of children in Kashin-Beck disease endemic areas in Shaanxi, China: assessment with mercury // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2018. – V. 40. – P. 903–913.
  15. Associations between selenium content in hair and Kashin-Beck disease/Keshan disease in children in northwestern China: a prospective cohort study / H. Liu, F. Yu, W. Shao, D. Ding, Z. Yu, F. Chen, D., Geng X. Tan, M.J. Lammi, X. Guo // *Biological Trace Element Research*. – 2018. – V. 184. – P. 16–23.
  16. Serious selenium deficiency in the serum of patients with Kashin-Beck disease and the effect of nano-selenium on their chondrocytes / L. Wang, J. Yin, B. Yang, C. Qu, J. Lei, J. Han, X. Guo // *Biological Trace Element Research*. – 2020. – V. 194. – P. 96–104.
  17. Аникина Л.В., Никитина Л.П. Селен. Экология, патология, коррекция. – Чита: ИИЦ ЧГМА, 2002. – 400 с.
  18. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
  19. Vetrov V.A., Kuznetsova A.I., Sklyarova O.A. Baseline levels of chemical elements in the water of Lake Baikal // *Geography and Natural Resources*. – 2013. – V. 34. – P. 228–238.
  20. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 264 с.
  21. Pye K., Blott S.J. Comparison of soils and sediments using major and trace element data // *Geological Society Special Publication*. – 2004. – V. 232. – P. 183–196.
  22. He Z.L., Yang X.E., Stoffella P.J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment // *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. – 2005. – V. 19. – P. 125–140.
  23. Watershed scale assessment of rare earth elements in soils derived from sedimentary rocks / B. de Albuquerque Pereira, Y.J.A.B. da Silva, C.W.A. do Nascimento, Y.J.A.B. da Silva, R.C. Nascimento, C.L. Boechat, R.S. Barbosa, V.P. Singh // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – V. 191. – Article 514.
  24. Alekseev A.O., Kalinin P.I., Alekseeva T.V. Soil indicators of paleoenvironmental conditions in the south of the East European Plain in the Quaternary time // *Eurasian Soil Science*. – 2019. – V. 52. – P. 349–358.
  25. Алексенцева Н.Н. Эколого-геохимические особенности территории Юго-Восточного Забайкалья, эндемичной по болезни Кашина-Бека: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Минск, 1987. – 20 с.
  26. Страховенко В.Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2011. – 33 с.
  27. Иванов А.Ю. Экогеохимия донных отложений малых водоемов юга Томской области: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 22 с.
  28. Heavy metals in surface sediments in the trans-Himalayan Koshi River catchment: distribution, source identification and pollution assessment / M. Li, Q. Zhang, X. Sun, K. Karki, C. Zeng, A. Pandey, B. Rawat, F. Zhang // *Chemosphere*. – 2020. – V. 244. – Article 125410.
  29. Новые данные об элементном составе природных вод в районе распространения уровской (Кашина-Бека) болезни (Забайкальский край) / Л.В. Замана, Л.П. Рихванов, Б.Р., Соктоев Н.В. Барановская, Е.С. Эпова, М.А. Солодухина, Л.А. Михайлова, Ю.Г. Копылова, А.А. Хвашевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 121–133.
  30. Виноградов А.П. Геохимические исследования в области распространения уровской эндемии // Доклады АН СССР. – 1939. – Т. 23. – № 1. – С. 64–67.
  31. К этиологии уровской (Кашина-Бека) болезни / А.В. Вощенко, В.Н. Чугаев, С.И. Вайстух, В.С. Бутко // Педиатрия: вопросы диагностики и лечения: тезисы докладов научно-практической конференции. – Чита: Изд-во Читинской государственной медицинской академии, 1988. – С. 20–23.
  32. Бутко В.С. Содержание и соотношение некоторых макро- и микроэлементов во внешней среде и тканях человека в районе уровской эндемии Восточного Забайкалья: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Чита, 1973. – 24 с.
  33. Бутко В.С. Содержание некоторых микроэлементов в рационах жителей уровской эндемии // Вопросы медицинской экологии и проблемы улучшения здоровья населения Забайкалья и КНДР. – Чита: Изд-во Читинской государственной медицинской академии, 1989. – С. 79–80.
  34. Минералого-геохимические особенности источника Ямкун (Забайкальский край) / Б.Р. Соктоев, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, Л.В. Замана, М.А. Рудмин, Е.С. Эпова, М.А. Солодухина, К.А. Этенко, Л.А. Михайлова, И.В. Холмогорова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 140–154.
  35. Evaluation of drinking water according to geochemical composition of its salt deposition / L. Rikhvanov, N. Baranovskaya, B. Soktoev, T. Mongolina // 8<sup>th</sup> International Conference on Environmental Engineering: proceedings. – Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University Publishing House «Technika», 2011. – P. 337–342.
  36. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Matveenko I.A. Mineralogical and geochemical characteristics of drinking water salt deposits // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27. – Article 012042.
  37. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, А.Р. Ялалтдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 25–36.
  38. Geochemical transformation of soil cover and woody vegetation in the largest industrial and transport center of Northern Mongolia (Darkhan) / N.E. Kosheleva, I.V. Timofeev, N.S. Kasimov, E.-A. Sandag // *Applied Geochemistry*. – 2019. – V. 107. – P. 80–90.
  39. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis / D.V. Yusupov, N.V. Baranovskaya, Y.V. Robertus, V.I. Radomskaya, L.M. Pavlova, A.F. Sudyko, L.P. Rikhvanov // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – P. 27111–27123.
  40. Баргали П. Биогеохимия наземных растений. – М.: ГЕОС, 2005. – 454 с.
  41. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Замятина Ю.Л. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиозологической ситуации. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 148 с.

42. Use of tree rings as a bioindicator to observe atmospheric heavy metal deposition / A. Turkyilmaz, H. Sevik, K. Isinkaralar, M. Cetin // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – V. 26. – P. 5122–5130.
43. Eby N. The smelters and the tree – an environmental story // Geology Today. – 2020. – V. 36. – Iss. 2. – P. 59–63.
44. Investigation of spatial and temporal metal atmospheric deposition in France through lichen and moss bioaccumulation over one century / Y. Agnan, N. Séjalon-Delmas, A. Claustres, A. Probst // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 529. – P. 285–296.
45. Malikova I.N., Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L. Distribution of radionuclides in moss-lichen cover and needles on the same grounds of landscape-climatic zones of Siberia // Journal of Environmental Radioactivity. – 2019. – V. 198. – P. 64–78.
46. Kudrevatykh I.Y., Kalinin P.I., Alekseev A.O. Biogenic accumulation of chemical elements by plants of Genus Poaceae Barnhart and Genus Artemisia L. in the dry steppe and semidesert zones of the south of the Russian Plain // Contemporary Problems of Ecology. – 2019. – V. 12. – P. 377–385.
47. Pollution assessment of heavy metals in soils and plants around a molybdenum mine in central China / Z. Han, D. Wan, H. Tian, W. He, Z. Wang, Q. Liu // Polish Journal of Environmental Studies. – 2019. – V. 28. – P. 123–133.
48. Biological and geochemical markers of the geographical origin and genetic identity of potatoes / P. Adamo, M. Zampella, C.R. Quérel, R. Aversano, F. dal Piaz, N. de Tommasi, L. Frusciante, M. Iorizzo, L. Lepore, D. Carputo // Journal of Geochemical Exploration. – 2012. – V. 121. – P. 62–68.
49. Impact of the coal mining-contaminated soil on the food safety in Shaanxi, China / R. Hussain, K. Luo, H. Liang, X. Hong // Environmental Geochemistry and Health. – 2019. – V. 41. – P. 1521–1544.
50. Влияние антропогенных геохимических факторов среды обитания на элементный статус детей п. Хапчеранга (Восточное Забайкалье) / Ю.А. Витковский, Л.А. Михайлова, Е.А. Бондаревич, М.А. Солодухина, Е.С. Эпова, О.В. Еремин, О.Г. Алексеева, Н.М. Бурлака, С.Э. Лапа, Н.В. Барановская, Е.В. Агеева // Забайкальский медицинский вестник. – 2018. – № 2. – С. 14–23.
51. Hair multi-bioelement profile of Kashin-Beck disease in the endemic regions of China / X. Wang, Y. Ning, P. Zhang, C. Li, R. Zhou, X. Guo // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2019. – V. 54. – P. 79–97.
52. Trace element levels in scalp hair of school children in Shigatse, Tibet, an endemic area for Kashin-Beck disease (KBD) / Y. Guo, H. Li, L. Yang, Y. Li, B. Wei, W. Wang, H. Gong, M. Guo, C. Nima, S. Zhao, J. Wang // Biological Trace Element Research. – 2017. – V. 180. – P. 15–22.
53. Барановская Н.В., Рихванов Л.П. Элементный состав органов и тканей домашних животных (*Sus scrofa domestica* (Artio dactyla, Mammalia)) как индикатор среды обитания // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2011. – № 3. – С. 74–84.
54. Элементный состав воды биологической как индикатор техногенеза / Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская Н.П. Корогод, А.А. Хвашевская, Ю.Г. Копылова, И.С. Мазурова, Р.Ж. Муканова, Т.К. Туркбенов, М.И. Скрипник, А.И. Баляновская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 214–223.
55. A regional approach for the calculation of characteristic toxicity factors using the USEtox model / A. Belyanovskaya, B. Laratte, N. Perry, N. Baranovskaya // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 655. – P. 676–683.
56. Уровская болезнь / К.П. Чепуров, А.В. Черкасова, Н.М. Акулов, И.И. Островский, Д.Ф. Мартынюк. – Благовещенск: Амурское книжное изд-во, 1955. – 199 с.
57. Рейнберг С.А. Рентгенодиагностика заболеваний костей и суставов. 4-е изд. – М.: Медицина, 1964. – Т. 1. – 529 с.
58. Отражение среды обитания в минералогических особенностях зольного остатка организма человека / М.А. Дериглазова, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, С.С. Ильенко // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2019. – Т. 25. – № 10. – С. 6–14.
59. Skinner C.W. Mineralogy of bone // Essentials of medical geology. – Dordrecht: Springer, 2013. – P. 665–687.
60. Виноградов А.П. О причинах происхождения уровской эндемии (геохимические исследования) // Труды Биогеохимической лаборатории. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. 9. – С. 5–29.
61. Biogeochemistry of calcium and strontium in the landscapes of Eastern Transbaikalia / V.V. Ermakov, U.A. Gulyaeva, S.F. Tyutikov, T.G. Kuz'mina, V.A. Safonov // Geochemistry International. – 2017. – V. 55. – P. 1105–1117.
62. Relationship of the mobile forms of calcium and strontium in soils with their accumulation in meadow plants in the area of Kashin-Beck endemia / V. Ermakov, J. Bech, U. Gulyaeva, S. Tyutikov, V. Safonov, V. Danilova, N. Roca // Environmental Geochemistry and Health. – 2020. – V. 42. – P. 159–171.
63. Zha X., Gao X. Ecological analysis of Kashin-Beck osteoarthropathy risk factors in Tibet's Qamdo City, China // Scientific Reports. – 2019. – V. 9. – Article 2471.
64. The role of humic substances in drinking water in Kashin-Beck disease in China / A. Peng, W.-H. Wang, C.-X. Wang, Z.-J. Wang, H.-F. Rui, W.-Z. Wang, Z.-W. Yang // Environmental Health Perspectives. – 1999. – V. 107. – P. 293–296.
65. Sudre P., Mathieu F. Kashin-Beck disease: from etiology to prevention or from prevention to etiology? // International Orthopaedics. – 2001. – V. 25. – P. 175–179.
66. Yao Y., Pei F., Kang P. Selenium, iodine, and the relation with Kashin-Beck Disease // Nutrition. – 2011. – V. 27. – P. 1095–1100.
67. Zinc: the other suspected environmental factor in Kashin-Beck disease in addition to selenium / X., Wang Y. Ning, L. Yang, F. Yu, X. Guo // Biological Trace Element Research. – 2017. – V. 179. – P. 178–184.

Поступила 20.01.2020 г.

#### Информация об авторах

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

**Соктоев Б.Р.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Барановская Н.В.**, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Агеева Е.В.**, инженер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Беляновская А.И.**, кандидат геолого-минералогических наук, инженер-исследователь отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Дериглазова М.А.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Юсупов Д.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и природопользования Амурского государственного университета; доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Этова Е.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук.

**Солодухина М.А.**, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук.

**Замана Л.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук.

**Михайлова Л.А.**, кандидат медицинских наук, заведующая кафедрой гигиены Читинской государственной медицинской академии.

**Большунова Т.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер отдела экологического нормирования управления экологии АО «ТомскНИПИнефть».

**Миронова А.С.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Наркович Д.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Судыко А.Ф.**, инженер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Полякова Д.А.**, магистрант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.42:504(571.55)

## COMPREHENSIVE GEOCHEMICAL RESEARCH OF THE ENVIRONMENTAL COMPONENTS IN ENDEMIC AREAS OF TRANSBAIKALIA

**Leonid P. Rikhvanov**<sup>1</sup>

**Bulat R. Soktoev**<sup>1</sup>,  
bulatsoktoev@tpu.ru

**Natalia V. Baranovskaya**<sup>1</sup>,  
nata@tpu.ru

**Elena V. Ageeva**<sup>1</sup>,  
ev\_ageeva@mail.ru

**Alexandra I. Belyanovskaya**<sup>1</sup>,  
aib28@tpu.ru

**Mariya A. Deriglazova**<sup>1</sup>,  
belyakinama@gmail.com

**Dmitry V. Yusupov**<sup>1,2</sup>,  
yusupovd@mail.ru

**Ekaterina S. Epova**<sup>3</sup>,  
apikur1@ya.ru

**Mariya A. Solodukhina**<sup>3</sup>,  
mabn@ya.ru

**Leonid V. Zamana**<sup>3</sup>,  
l.v.zamana@mail.ru

**Larisa A. Mikhailova**<sup>4</sup>,  
mihailova-la@mail.ru

**Tatiana S. Bolshunova**<sup>5</sup>,  
bts26@mail.ru

**Anastasiya S. Mironova**<sup>1</sup>,  
nasie2710@gmail.com

**Dina V. Narkovich**<sup>1</sup>,  
shvezova\_d@mail.ru

**Alexander F. Sudyko**<sup>1</sup>,  
sudykoaf@yandex.ru

**Darya A. Polyakova**<sup>1</sup>,  
darya.darya2012@mail.ru

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

<sup>2</sup> Amur State University,  
21, Ignatievskoe highway, Blagoveshchensk, 675027, Russia.

<sup>3</sup> Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
16a, Nedorezov street, Chita, 672002, Russia.

<sup>4</sup> Chita State Medical Academy,  
39a, Gorky street, Chita, 672000, Russia.

<sup>5</sup> Tomsk Oil and Gas Research and Design Institute,  
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

**The relevance of the research.** *Kashin–Beck disease, or Urov disease, is a classic example of endemic diseases. However, unlike other diseases, the cause of this one has not yet been determined. Currently, the scientists discuss more than 20 theories and hypotheses that explain its etiology and factors. The priority theory is the biogeochemical one, according to which the occurrence and history of the disease depends on the environmental factor (lack/excess of chemical elements or compounds). In this regard, the study of the environmental geochemistry in the area of Kashin–Beck disease is relevant.*

**The main aim** of the research is to assess the environmental components geochemical features in the territory of south-eastern Transbaikalia, area of Kashin–Beck disease distribution.

**Objects:** environmental components – soil, bottom sediments, natural waters (surface, underground), drinking water salt sediments, core of tree rings, poplar leaves, lichen, moss, wormwood, potato, children’s hair, bones of domestic pig.

**Methods:** instrumental neutron activation analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry for detection of chemical composition of environmental components; processing of the obtained data included normalization of chemical elements content relative to background values (the noosphere clarke, water of Lake Baikal) and calculation of indicative ratios.

**Results.** The content of 26 (instrumental neutron activation analysis) and 62 (inductively coupled plasma mass spectrometry) chemical elements in 13 environmental components was studied. In the element composition of all the studied components, a regional geochemical association (Zn-Pb-Ba-Sb-As-Bi-Au) was identified, associated with the features of the regional metallogeny. For future research, the most informative components are natural waters, bone tissue, and children’s hair. The most contrasting geochemical specialization of the environment is formed in settlements where, according to literature data, the maximum incidence of Kashin–Beck disease is observed. The disease etiology is multifactorial: natural conditions play an important role in the development of the disease, which leads to an imbalance in the element composition of the environmental components and, respectively, the human body.

**Key words:**

*Kashin–Beck disease, Urov disease, south-eastern Transbaikalia, environmental geochemistry, indicative ratios.*

The research was carried out within the Program of enhancement of TPU competitiveness among the leading world's research centers. ICP-MS analysis was performed within the framework of the grant from the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-35-90061). Data processing and interpretation of the results were performed within the framework of the grant from the Russian Science Foundation (project no. 20-64-47021).

## REFERENCES

1. *Spravochnik po geokhicheskim poiskam poleznykh iskopaemym* [Handbook of geochemical prospecting for minerals]. Ed. by A.P. Solovyov. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
2. *Khimicheskiy analiz v geologii i geokhimi* [Chemical analysis in geology and geochemistry]. Ed. by G.N. Anoshin. Novosibirsk, Geo Academic Publ., 2016. 622 p.
3. Rikhvanov L.P., Abrosimova N.A., Baranovskaya N.V., Bolshunova T.S., Gorbatyuk E.A., Edelev A.V., Mezhibor A.M., Myagkaya I.N., Soktoev B.R., Yusupov D.V., Belan L.N., Bortnikova S.B., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M., Ischuk N.V., Kirichenko I.S., Narkovich D.V., Lazareva E.V., Olenchenko V.V., Saeva O.P., Saryg-ool B.Yu., Usmanova T.V., Yurkevich N.V. *Biogeokhicheskii monitoring v rayonakh khvostokhranilishch gornodobyvayushchikh predpriyatiy s uchetom mikrobiologicheskikh faktorov transformatsii mineralnykh komponentov* [Biogeochemical monitoring of tailings of mining industry, taking into account microbiological factors of the mineral component transformation]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2017. 437 p.
4. Dampirov N.I. Karta rasprostraneniya urovskoy bolezni [Map of Urov disease distribution]. *Urovskaya bolezni v Zabaykalye* [Urov disease in Transbaikalia]. Irkutsk, 1934. pp. 15–23.
5. Khachumova K.G., Lytkina K.A., Ilyina E.Yu. Kashin–Beck disease: diagnostics, differential diagnosis. *Bulletin of Russian State Medical University*, 2010, no. 6, pp. 15–19. In Rus.
6. Allander E. Kashin–Beck disease. An analysis of research and public health activities based on a bibliography 1849–1992. *Scandinavian Journal of Rheumatology*, 1994, vol. 23, pp. 1–36.
7. Yamamuro T. Kashin–Beck disease: a historical overview. *International Orthopaedics*, 2001, vol. 25, pp. 134–137.
8. Stone R. A medical mystery in middle China. *Science*, 2009, vol. 324, pp. 1378–1381.
9. *Big bone disease: a multidisciplinary approach of Kashin–Beck disease in Tibet Autonomous Region (P.R. China)*. Eds. F. Malaisse, F. Mathieu. Gembloux, Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2008. 148 p.
10. Ivanova M.A., Ivanov O.M. New medical technologies in the study of the Kashin–Beck disease and COPD. *Journal of New Medical Technologies*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 209–218. In Rus.
11. Wang K., Yu J., Liu H., Liu Y., Liu N., Cao Y., Zhang X., Sun D. Endemic Kashin–Beck disease: A food-sourced osteoarthritis. *Seminars in Arthritis and Rheumatism*, 2020, vol. 50, pp. 366–372.
12. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tretye pokolenie). List M-50 – Borzya. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third edition). Chart sheet M-50 – Borzya. Explanatory note]. St. Petersburg, Cartographic enterprise of A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 2010. 553 p.
13. Guo X., Ning Y., Wang X. Selenium and Kashin–Beck disease. *Selenium: Chemistry, Analysis, Function and Effects (Food and Nutritional Components in Focus)*. Ed. by V.R. Preedy. Cambridge, Royal Society of Chemistry, 2015. pp. 552–571.
14. Du B., Zhou J., Zhou J. Selenium status of children in Kashin–Beck disease endemic areas in Shaanxi, China: assessment with mercury. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, vol. 40, pp. 903–913.
15. Liu H., Yu F., Shao W., Ding D., Yu Z., Chen F., Geng D., Tan X., Lammi M.J., Guo X. Associations between selenium content in hair and Kashin–Beck disease/Keshan disease in children in northwestern China: a prospective cohort study. *Biological Trace Element Research*, 2018, vol. 184, pp. 16–23.
16. Wang L., Yin J., Yang B., Qu C., Lei J., Han J., Guo X. Serious selenium deficiency in the serum of patients with Kashin–Beck disease and the effect of nano-selenium on their chondrocytes. *Biological Trace Element Research*, 2020, vol. 194, pp. 96–104.
17. Anikina L.V., Nikitina L.P. *Selen. Ekologiya, patologiya, korrektsiya* [Selenium. Ecology, pathology, correction]. Chita, Printing and publications center of Chita State Medical Academy, 2002. 400 p.
18. Glazovskaya M.A. *Geokhimiya prirodnykh i tekhnogenykh landshaftov SSSR* [Geochemistry of natural and technogenic landscapes of USSR]. Moscow, Vysshaya shkola, 1988. 328 p.
19. Vetrov V.A., Kuznetsova A.I., Sklyarova O.A. Baseline levels of chemical elements in the water of Lake Baikal. *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, pp. 228–238.
20. Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhornyak L.V. *Otsenka ekologo-geokhicheskogo sostoyaniya territorii g. Tomsk po dannym izucheniya pyleaerozoley i pochv* [Assessment of ecogeochemical conditions of Tomsk city according to investigations of dust aerosols and soils]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 264 p.
21. Pye K., Blott S.J. Comparison of soils and sediments using major and trace element data. *Geological Society Special Publication*, 2004, vol. 232, pp. 183–196.
22. He Z.L., Yang X.E., Stoffella P.J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, vol. 19, pp. 125–140.
23. De Albuquerque Pereira B., Da Silva Y.J.A.B., Do Nascimento C.W.A., Da Silva Y.J.A.B., Nascimento R.C., Boechat C.L., Barbosa R.S., Singh V.P. Watershed scale assessment of rare earth elements in soils derived from sedimentary rocks. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, article 514.
24. Alekseev A.O., Kalinin P.I., Alekseeva T.V. Soil indicators of paleoenvironmental conditions in the south of the East European Plain in the Quaternary time. *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, pp. 349–358.
25. Aleksentseva N.N. *Ekologo-geokhicheskies osobennosti territorii Yugo-Vostochnogo Zabaikalya, endemichnoy po bolezni Kashina–Beka*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecogeochemical features of South-Eastern Transbaikalia territory endemic on Kashin–Beck disease. Cand. Diss. Abstract]. Minsk, 1987. 20 p.
26. Strakhovenko V.D. *Geokhimiya donnykh otlozheniy malykh kontinentalnykh ozer Sibiri*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Geochemistry of bottom sediments of small continental lakes of Siberia. Dr. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2011. 33 p.
27. Ivanov A.Yu. *Ekogeokhimiya donnykh otlozheniy malykh vodoe-mov yuga Tomskoy oblasti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Environmental geochemistry of bottom sediments in small lakes of Tomsk Oblast southern part. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2018. 22 p.
28. Li M., Zhang Q., Sun X., Karki K., Zeng C., Pandey A., Rawat B., Zhang F. Heavy metals in surface sediments in the trans-Himalayan Koshi River catchment: distribution, source identification and pollution assessment. *Chemosphere*, 2020, vol. 244, article 125410.
29. Zamana L.V., Rikhvanov L.P., Soktoev B.R., Baranovskaya N.V., Epova E.S., Solodukhina M.A., Mikhailova L.A., Kopylova Y.G., Khvashchevskaya A.A. New data on chemical composition of natural waters in the area of distribution of Urov (Kashin–Beck) disease (Transbaikalia region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 121–133. In Rus.
30. Vinogradov A.P. Geokhicheskies issledovaniya v oblasti rasprostraneniya urovskoy endemii [Geochemical investigations in the area of Urov endemia]. *Doklady of AS USSR*, 1939, vol. 23, no. 1, pp. 64–67. In Rus.
31. Voschenko A.V., Chugaev V.N., Vaistukh S.I., Butko V.S. K etiologii urovskoy (Kashina–Beka) bolezni [On the etiology of Urov (Kashin–Beck) disease]. *Pediatriya: voprosy diagnostiki i lecheniya: tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Pediatrics: questions of diagnosis and treatment: proceedings of research and practical conference]. Chita, Chita State Medical Academy Publ., 1988. pp. 20–23.
32. Butko V.S. *Soderzhanie i sootnoshenie nekotorykh makro- i mikroelementov vo vneshney srede v rayone urovskoy endemii Vostochnogo Zabaikalya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Content



- and ratio of some macro- and trace elements in the environment and human tissues in the area of Urov endemia (Eastern Transbaikalia). Cand. Diss. Abstract]. Chita, 1973. 24 p.
33. Butko V.S. Soderzhanie nekotorykh mikroelementov v ratsionakh zhitel'ey urovskoy endemii [Some trace elements content in the dietary of Urov endemia residents]. *Voprosy meditsinskoj ekologii i problem uluchsheniya zdorovya naseleniya Zabaikalya I KNDR* [Questions of medical ecology and problems of health improvement of Transbaikalia and DPRK population]. Chita, Chita State Medical Academy Publ., 1989. pp. 79–80.
  34. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Zamana L.V., Rudmin M.A., Epova E.S., Solodukhina M.A., Etenko K.A., Mikhailova L.A., Kholmogorova I.V. Mineral and geochemical features of Yamkun spring (Transbaikal region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 7, pp. 140–154. In Rus.
  35. Rikhvanov L., Baranovskaya N., Soktoev B., Mongolina T. Evaluation of drinking water according to geochemical composition of its salt deposition. *8<sup>th</sup> International Conference on Environmental Engineering*. Vilnius, Vilnius Gediminas Technical University Publ. «Technika», 2011. pp. 337–342.
  36. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Matveenko I.A. Mineralogical and geochemical characteristics of drinking water salt deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, Article 012042.
  37. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Yalaltdinova A.R. Geochemical features of poplar leaf elemental composition in urban areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 25–36. In Rus.
  38. Kosheleva N.E., Timofeev I.V., Kasimov N.S., Sandag E.-A. Geochemical transformation of soil cover and woody vegetation in the largest industrial and transport center of Northern Mongolia (Darkhan). *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 107, pp. 80–90.
  39. Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Robertus Y.V., Radomskaya V.I., Pavlova L.M., Sudyko A.F., Rikhvanov L.P. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 27111–27123.
  40. Bargali R. *Biogekhimiya nazemnykh rasteniy* [Biogeochemistry of terrestrial plants]. Moscow, GEOS Publ., 2005. 454 p.
  41. Rikhvanov L.P., Arhangel'skaya T.A., Zamyatina Yu.L. *Dendroradiografiya kak metod retrospektivnoy otsenki radioekologicheskoy situatsii* [Dendroradiography as a method of retrospective assessment of radioecological situation]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2015. 148 p.
  42. Turkyilmaz A., Sevik H., Isinkaralar K., Cetin M. Use of tree rings as a bioindicator to observe atmospheric heavy metal deposition. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, pp. 5122–5130.
  43. Eby N. The smelters and the tree – an environmental story. *Geology Today*, 2020, vol. 36, no. 2, pp. 59–63.
  44. Agnan Y., Séjalon-Delmas N., Claustres A., Probst A. Investigation of spatial and temporal metal atmospheric deposition in France through lichen and moss bioaccumulation over one century. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 529, pp. 285–296.
  45. Malikova I.N., Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L. Distribution of radionuclides in moss-lichen cover and needles on the same grounds of landscape-climatic zones of Siberia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 198, pp. 64–78.
  46. Kudrevatykh I.Y., Kalinin P.I., Alekseev A.O. Biogenic accumulation of chemical elements by plants of Genus Poaceae Barnhart and Genus Artemisia L. in the dry steppe and semidesert zones of the south of the Russian Plain. *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, vol. 12, pp. 377–385.
  47. Han Z., Wan D., Tian H., He W., Wang Z., Liu Q. Pollution assessment of heavy metals in soils and plants around a molybdenum mine in central China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, vol. 28, pp. 123–133.
  48. Hussain R., Luo K., Liang H., Hong X. Impact of the coal mining-contaminated soil on the food safety in Shaanxi, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, vol. 41, pp. 1521–1544.
  49. Adamo P., Zampella M., Quélet C.R., Aversano R., Dal Piaz F., De Tommasi N., Frusciante L., Iorizzo M., Lepore L., Carputo D. Biological and geochemical markers of the geographical origin and genetic identity of potatoes. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, vol. 121, pp. 62–68.
  50. Vitkovskiy Yu.A., Mikhailova L.A., Nondarevich E.A., Solodukhina M.A., Epova E.S., Eremin O.V., Alekseeva O.G., Burlaka N.M., Lapa S.E., Baranovskaya N.V., Ageeva E.V. Influence of anthropogenic geochemical environmental factors on the element status of children in Khapcheranga (Eastern Transbaikalia). *Transbaikalian Medical Bulletin*, 2018, no. 2, pp. 14–23. In Rus.
  51. Wang X., Ning Y., Zhang P., Li C., Zhou R., Guo X. Hair multi-element profile of Kashin–Beck disease in the endemic regions of China. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2019, vol. 54, pp. 79–97.
  52. Guo Y., Li H., Yang L., Li Y., Wei B., Wang W., Gong H., Guo M., Nima C., Zhao S., Wang J. Trace element levels in scalp hair of school children in Shigatse, Tibet, an endemic area for Kashin–Beck disease (KBD). *Biological Trace Element Research*, 2017, vol. 180, pp. 15–22.
  53. Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P. Elementny sostav organov i tkany domashnykh zhivotnykh (Sus scrofa domestica (Artio dactilia, Mammalia)) kak indikator sredy obitaniya [Elemental composition of organs and tissues of domestic animals (Sus scrofa domestica (Artio dactilia, Mammalia)) as an indicator of habitat]. *Problemy biogekhimii i geokhimicheskoy ekologii*, 2011, no. 3, pp. 74–84.
  54. Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Korogod N.P., Khvashchevskaya A.A., Kopylova Y.G., Mazurova I.S., Mukanova R.Z., Turkbenov T.K., Skripnik M.I., Belyanovskaya A.I. Elemental composition of biological water as an indicator of technogenesis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 330, no. 2, pp. 214–223. In Rus.
  55. Belyanovskaya A., Laratte B., Perry N., Baranovskaya N. A regional approach for the calculation of characteristic toxicity factors using the USEtox model. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 655, pp. 676–683.
  56. Chepurov K.P., Cherkasova A.V., Akulov N.M., Ostrovskiy I.I., Martynyuk D.F. *Urovskaya bolezny* [Urov disease]. Blagoveshchensk, Amur book Publ. house, 1955. 199 p.
  57. Reynberg S.A. *Rentgenodiagnostika zabolevaniy kostey i sustavov* [X-ray diagnosis of musculoskeletal disorders]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Meditsina Publ., 1964. Vol. 1, 529 p.
  58. Deriglazova M.A., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Ilenok S.S. Reflection of the habitat in the mineralogical features of the ash residues of a human organism. *Transbaikalian State University Journal*, 2019, vol. 25, no. 10, pp. 6–14. In Rus.
  59. Skinner C.W. Mineralogy of bone. *Essentials of medical geology*. Dordrecht, Springer, 2013. pp. 665–687.
  60. Vinogradov A.P. O prichinakh proiskhozhdeniya urovskoy endemii (geokhimicheskie issledovaniya) [On reasons of Urov disease genesis (geochemical investigations)]. *Trudy Biogekhimicheskoy laboratorii* [Publications of Biogeochemical Laboratory]. Moscow, AS USSR Publ., 1949, vol. 9, pp. 5–29.
  61. Ermakov V.V., Gulyaeva U.A., Tyutikov S.F., Kuzmina T.G., Safonov V.A. Biogeochemistry of calcium and strontium in the landscapes of Eastern Transbaikalia. *Geochemistry International*, 2017, vol. 55, pp. 1105–1117.
  62. Ermakov V., Bech J., Gulyaeva U., Tyutikov S., Safonov V., Danilova V., Roca N. Relationship of the mobile forms of calcium and strontium in soils with their accumulation in meadow plants in the area of Kashin–Beck endemia. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, vol. 42, pp. 159–171.
  63. Zha X., Gao X. Ecological analysis of Kashin–Beck osteoarthropathy risk factors in Tibet's Qamdo City, China. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, Article 2471.
  64. Peng A., Wang W.-H., Wang C.-X., Wang Z.-J., Rui H.-F., Wang W.-Z., Yang Z.-W. The role of humic substances in drinking water in Kashin–Beck disease in China. *Environmental Health Perspectives*, 1999, vol. 107, pp. 293–296.
  65. Sudre P., Mathieu F. Kashin–Beck disease: from etiology to prevention or from prevention to etiology? *International Orthopaedics*, 2001, vol. 25, pp. 175–179.
  66. Yao Y., Pei F., Kang P. Selenium, iodine, and the relation with Kashin–Beck Disease. *Nutrition*, 2011, vol. 27, pp. 1095–1100.
  67. Wang X., Ning Y., Yang L., Yu F., Guo X. Zinc: the other suspected environmental factor in Kashin–Beck disease in addition to selenium. *Biological Trace Element Research*, 2017, vol. 179, pp. 178–184.

Received: 20 January 2020.

**Information about the authors**

- Leonid P. Rikhvanov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Bulat R. Soktoev**, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Natalia V. Baranovskaya**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Elena V. Ageeva**, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Alexandra I. Belyanovskaya**, Cand. Sc., research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Mariya A. Deriglazova**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Dmitry V. Yusupov**, Cand. Sc., associate professor, Amur State University; associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Ekaterina S. Epova**, Cand. Sc., research scientist, Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology.  
**Mariya A. Solodukhina**, Cand. Sc., research scientist, Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology.  
**Leonid V. Zamana**, Cand. Sc., leading research scientist, Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology.  
**Larisa A. Mikhailova**, Cand. Sc., head of the department, Chita State Medical Academy.  
**Tatiana S. Bolshunova**, Cand. Sc., engineer, Tomsk Oil and Gas Research and Design Institute.  
**Anastasiya S. Mironova**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Dina V. Narkovich**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Alexander F. Sudyko**, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Darya A. Polyakova**, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.837.312:556.531.4

## ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И ГАЗОВЫЕ АНОМАЛИИ НА СУЛЬФИДНОМ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ (САЛАИР, КЕМЕРОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

**Бортникова Светлана Борисовна<sup>1</sup>,**  
BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

**Юркевич Наталия Викторовна<sup>1</sup>,**  
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Еделев Алексей Викторович<sup>1</sup>,**  
EdelevAV@ipgg.sbras.ru

**Саева Ольга Петровна<sup>1</sup>,**  
SaevaOP@ipgg.sbras.ru

**Грахова София Павловна<sup>1</sup>,**  
GrakhovaSP@ipgg.sbras.ru

**Волынкин Сергей Сергеевич<sup>1</sup>,**  
VolynkinSS@ipgg.sbras.ru

**Карин Юрий Григорьевич<sup>1</sup>,**  
KarinYG@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

**Актуальность** исследования связана с получением новых данных по процессам, происходящим в складированных сульфидных отходах, их трансформации под действием окислительных факторов, миграции токсичных компонентов в окружающую среду.

**Цель:** определение вертикальной зональности по элементному составу и содержанию газов (сероуглерода и диметилсульфида) в хвостохранилище, а также установление гидрохимических аномалий в ближайшей реке в результате миграции потенциально токсичных элементов с водными потоками из отходов.

**Объект:** заброшенное хвостохранилище Салаирского горно-обогатительного комбината – Талмовские Пески (г. Салаир, Кемеровская область), вмещающее отходы цианирования и флотации барит-полиметаллических руд.

**Методы.** В полевых условиях проводилась термометрия, газовый анализ, электроразведка методом сопротивлений в режиме электротомографии. Отбор твердых и жидких проб выполнялся в соответствии с общепринятыми методиками. Лабораторное изучение химического состава проб проводилось методами кондуктометрии, потенциометрии, капиллярного электрофореза, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

**Результаты.** Распределение общих концентраций элементов по вертикали определяется неоднородностью складированного материала отходов. На примере двух разрезов до глубины 1,2 м определено, что влажность вещества возрастает с глубиной, а температура, значения pH паст и водных вытяжек снижаются. С глубиной закономерно возрастает количество водорастворимых форм металлов за счет преобразования сульфидов в кислых условиях, а также вследствие поступления из верхних горизонтов. Газогенерация сероуглерода и диметилсульфида, напротив, возрастает к верхним слоям хвостохранилища, что, всего скорее, связано как с их накоплением, так и интенсивным преобразованием минеральной матрицы и активным функционированием биоты в верхних прогреваемых слоях с нейтральной реакцией среды. В результате активных взаимодействий вещества отходов с водой и газами в реке Малой Талмовой, в русле которой расположено хвостохранилище, формируются контрастные гидрохимические аномалии с высокими концентрациями металлов.

### **Ключевые слова:**

Хвостохранилище, газовыделение, микроэлектротомография, серосодержащие газы, загрязнение природных вод, удельное электрическое сопротивление, кислые воды.

### **Введение**

Проблема складированных сульфидных отходов, их трансформации под действием окислительных факторов, миграции токсичных компонентов в окружающую среду исследуется и обсуждается широко [1–6 и многие другие]. Разрушение сульфидных минералов приводит к растворению вещества, формированию кислых потоков с высокими концентрациями металлов и металлоидов [7, 8]. На окружающих хранилища территориях образуются контрастные аномалии металлов и металлоидов в почвах [9–11], водоемах [12–14]. Кроме того, из сульфидсодержащих отходов выделяется целый спектр азот-, серо- и селенсодержащих газов, в том числе и неорганического происхождения, а также под воздействием микробиологических процессов, в том числе и метилирования [15–17]. В результате вещество отходов находится в постоянном взаимодействии со специфическим флюидом, состоящим из смеси жидкой и газовой фаз и

характеризующимся широким диапазоном физико-химических параметров, концентраций макро- и микроэлементов в зависимости от условий формирования и состава вмещающей среды. Следствием взаимодействий в системе твердое–вода–газ в условиях сульфидных отходов являются водные и газовые потоки, распространяющиеся в окружающей среде. При этом на фоне широкого обсуждения различных закономерностей и особенностей кислого дренажа процессы газообразования в сульфидных отходах остаются малоизученными. Проведено комплексное исследование состава, строения и зональности, включая газообразование, одного из хвостохранилищ Западной Сибири, информация о котором представлена в статье [18].

Цели данной работы: 1) определение вертикальной зональности хвостохранилища, образованного 80–90 лет назад в русле реки Малая Талмовая (Гурьевский район, Кемеровская область); 2) выявление закономерностей концентрирования подвижных форм

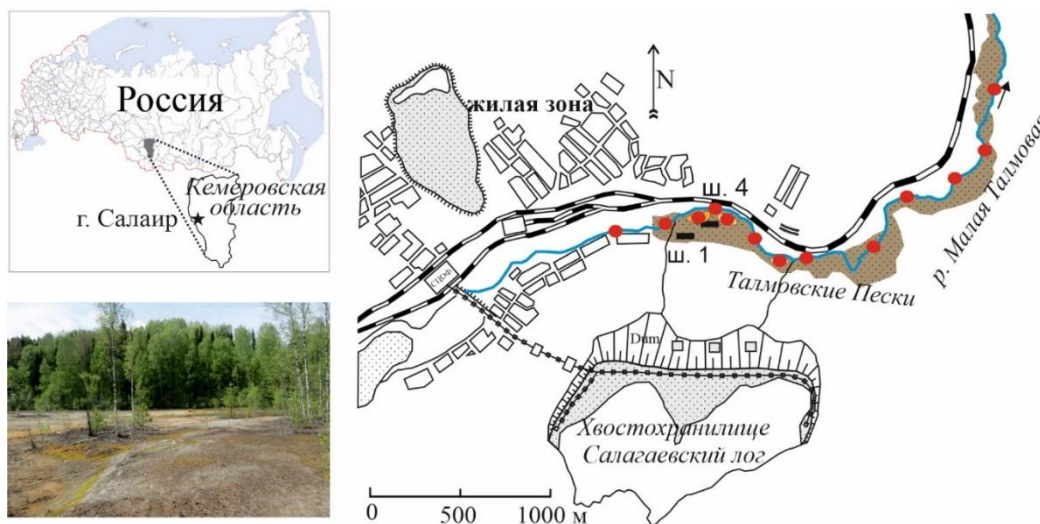
элементов по разрезу; 3) оценка уровня образования газов сероуглерода и диметилсульфида в разных горизонтах хвостохранилища; 4) установление гидрохимических аномалий в р. Малая Талмовая в результате миграции потенциально токсичных элементов с водными потоками из хвостохранилища.

#### Объект исследования

Хвостохранилище Талмовские Пески расположено в г. Салаир, в Кемеровской области (рис. 1).

Салаирский горно-обогатительный комбинат начал работать с 30-х гг. прошлого века и разрабатывал золото- и серебросодержащие барит-полиметаллические руды месторождений Салаирского рудного поля, приуроченного к кембрийскому палеовулканическому куполу. Купол поднимается среди мощного комплекса известняков гавриловской свиты нижнекембрийского возраста ( $\epsilon_{1gv}$ ). Сложен он порфирами риолит-дацитового состава, туфами,

туфитами, андезитовыми порфирами, дацитовыми порфирами. Рудные тела приурочены к нижнекембрийским субвулканическим кварц-плагиоклазовым порфирам печеркинской свиты ( $\epsilon_{1p\epsilon}$ ). Геологическое строение поля и минералогия рудных тел детально изучены и описаны многими сибирскими геологами [19–23]. Рудные тела месторождения представляют собой гидротермально-метасоматические образования сливных и прожилково-вкрапленных руд. Сульфиды представлены пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, блеклыми рудами (теннантит). К редким минералам рудных тел, обнаруженных в кварц-карбонатных штокверках, пересекающих барит-полиметаллические тела, относятся сульфосоли (пирсенит, полибазит), теллуриды серебра, золота и свинца (гессит, петцит, эмпрессит, алтаит), самородное золото и серебро [24]. Жильные минералы: кварц, барит, кальцит, серицит и хлорит.



**Рис. 1.** Географическое положение, схема отprobования и внешний вид хвостохранилища Талмовские Пески. Черные прямоугольники – участки шурфов (ш. 1 и 4); красные кружки – точки отбора проб воды по реке Малой Талмовой и в водоёмах

**Fig. 1.** Geographical location, sampling scheme and appearance of the Talmovskie Peski tailings dump. Black rectangles – pits (pit 1 and 4); red circles – points of water sampling along the Malaya Talmovaya River and in water bodies

В начале эксплуатации месторождения разрабатывались верхние, наиболее богатые части рудных тел из зоны окисления. Переработка руд производилась на Золотоизвлекательной фабрике методами гравитации, цианирования и флотации.

С 1932 по 1942 гг. отходы обогащения складировались в запруженное дамбой русло реки Малой Талмовой. После заполнения отходами получившегося искусственного пруда ниже по течению сооружалась следующая дамба, и процесс повторялся. В настоящее время хвостохранилище Талмовские Пески представляет собой узкую (до 30 м) ленту песков протяженностью около 8 км, в непосредственной близости от которых протекает река Малая Талмовая. Мощность техногенных отложений не превышает 3 м, что составляет около 1 млн т. Вещество отходов подвержено интенсивному окислению за счет кислорода атмосферы и сезонных осадков, в результате чего суль-

фидные минералы подвержены значительному разрушению и преобразованию [25].

#### Методы. Полевые исследования

Во время полевых работ были выкопаны несколько шурфов на хвостохранилище на всю глубину песков, до подстилающих почв. В данном случае почвы оказались уже на глубине 120 см. По стенкам шурфов описана зональность и отprobованы все визуально различающиеся слои. Пробы отбирались титановым совком и упаковывались в герметично закрывающиеся пакеты (грипперы).

В каждом слое измерялись температура вещества электронным термометром ЛТ-300-Н (производство ООО «ТЕРМЭКС», г. Томск) и концентрации газов (сероуглерода и диметилсульфида) мобильным газоанализатором ГАНК-4М (производство ООО НПО «Прибор» ГАНК, г. Москва). В измеряемом участке

стенки шурфа делалось небольшое углубление, в котором производилось измерение газов. Таким образом мы получали концентрацию газов в поровом пространстве.

По линии каждого шурфа были построены профили микроэлектротомографии для выявления геоэлектрической зональности и сопоставления её с геохимическими параметрами. Измерения проводились многоэлектродной установкой Скала-48, расстояние между электродами – 30 см, длина профиля – 14,1 м. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже. Решение обратной задачи электроразведки выполнялось с помощью программы Res2Dinv [26], при этом применялся сглаженный способ инверсии. В результате двумерной инверсии строились модели геоэлектрических разрезов. Ошибка решения обратной задачи не превышала 2 %.

Река Малая Талмовая была опробована летом 2020 г. от точки, расположенной выше по течению от складированных отходов, и далее через 200–250 м были взяты пробы воды на всем протекании реки по г. Салаир. Кроме того, были взяты пробы из трех небольших водоёмов рыжего цвета, образованных на поверхности отходов за счет сезонных осадков. Пробы воды брались в пластиковые одноразовые контейнеры с предварительным трёхкратным ополаскиванием в точке взятия пробы. На месте измерялись значения pH (pH/T-метром HI 9025 С, HANNA Instruments, США) и электропроводности (УЭП) кондуктометром Cond 315 i (WTW, США), пробы разделялись на две части. Одна часть, предназначенная для элементного анализа, фильтровалась через мембранный фильтр

0,45 мкм и затем подкислялась ультрачистой  $\text{HNO}_3$  до pH 2. Вторую часть оставляли нетронутой, для определения основных анионов. Затем контейнеры герметично закрывались и хранились в прохладном месте.

#### Лабораторные анализы

В лабораторных условиях пробы из шурфов были гомогенизированы и разделены на три части. В первой части была измерена влажность весовым методом, и затем сухие пробы были истерты для анализов. Из второй части были приготовлены пасты (твердое/вода=2/1) для определения кислотно-основного баланса вещества [27], и в них измерены значения pH и электропроводности вышеупомянутыми приборами. Водные вытяжки (твердое/вода=1/10) для определения концентраций подвижных форм элементов были приготовлены из третьей части проб. В водных вытяжках также были измерены значения pH и электропроводности. Концентрации основных ионов определялись методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель 105-М» (Люмэкс, г. Санкт-Петербург). Микроэлементный состав определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 8800 (Agilent Technologies, США).

#### Результаты

В вертикальном строении хвостохранилища проявилась большая неоднородность, как в составе вещества, так и в физико-химических характеристиках. Общей для всех разрезов закономерностью является увеличение влажности вещества, кислотности среды, электропроводности (с некоторыми колебаниями) с глубиной (рис. 2).

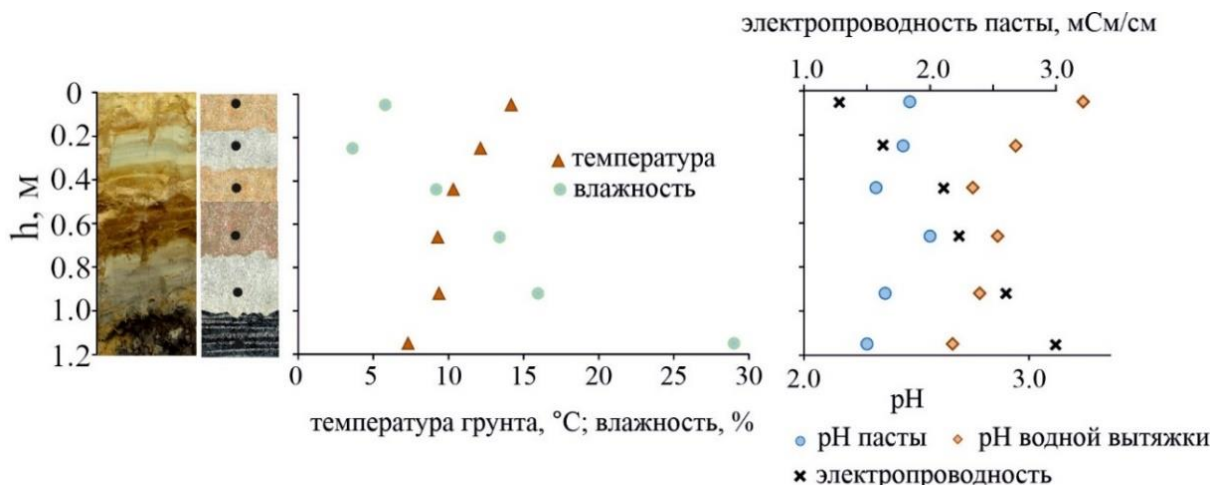
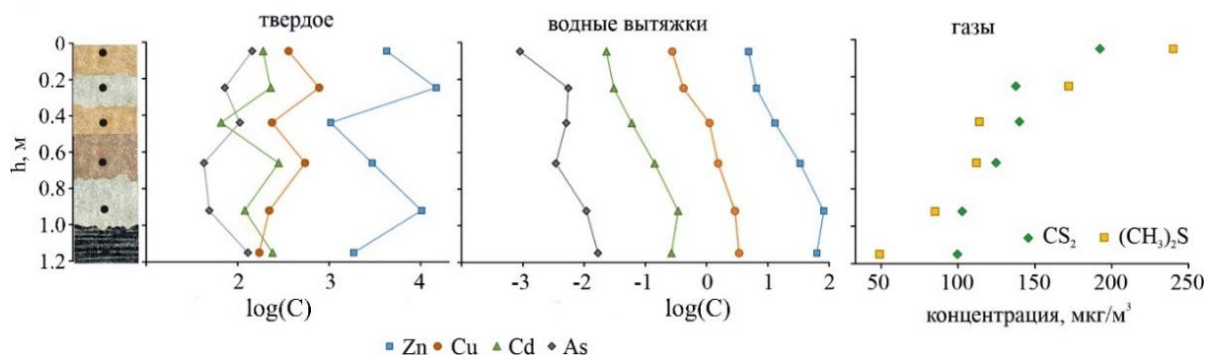


Рис. 2. Изменение параметров вещества хвостохранилища с глубиной (шурф № 1)

Fig. 2. Change in the parameters of the tailing dump matter with depth (pit no. 1)

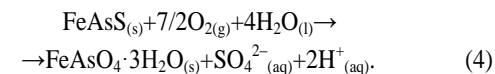
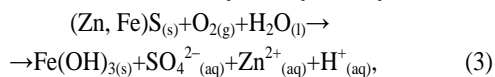
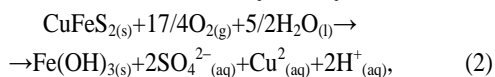
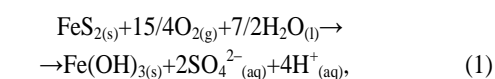
Температура и концентрации газов закономерно снижаются к нижним горизонтам. Наибольшие концентрации газов обнаружены в верхних горизонтах, в то время как накопление растворимых форм элементов происходит в нижних частях разреза, причем вне зависимости от их валового содержания (рис. 3).

Окисление сульфидов, в первую очередь, пирита, ведет к образованию кислоты, выходу металлов в растворы и увеличению минерализации поровых вод согласно реакциям (1)–(4) [3], где обозначениями (s), (g), (l), (aq) обозначены твердая, газообразная, жидкая и растворенная формы вещества, соответственно.



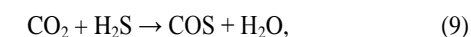
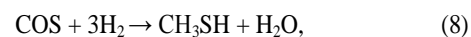
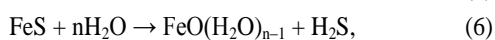
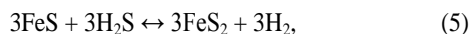
**Рис. 3.** Распределение общих концентраций металлов, их подвижных форм и некоторых газов по вертикали (шурф № 1). *Примечание:  $\log(C)$  – десятичный логарифм содержания элемента, выраженного в мг/л и в г/т в воде и в твердом веществе, соответственно*

**Fig. 3.** Vertical distribution of total concentrations of metals, their mobile forms and some gases (pit no. 1). *Note:  $\log(C)$  is the decimal logarithm of the element content, expressed in mg/l and g/t in water and solid, respectively*



Фильтрация поверхностных вод способствует миграции поровых растворов книзу и накоплению растворенных форм элементов в нижних частях разреза.

Формирование обсуждаемых газов: сероуглерода и диметилсульфида, происходит по разным механизмам. Согласно экспериментальным исследованиям [28, 29], сероуглерод ( $\text{CS}_2$ ) и карбонилсульфид ( $\text{COS}$ ) абиогенно генерируются при разложении сульфидных минералов (в основном пирита) в неравновесных условиях. При этом образование диметилсульфида ( $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ ) предположительно может являться результатом жизнедеятельности микроорганизмов, а метилсульфид ( $\text{CH}_3\text{SH}$ ) может иметь как биогенное, так и абиогенное происхождение. На основе результатов предшествующих исследований [30, 31] предполагается, что для системы  $\text{FeS}/\text{FeS}_2$  следующие взаимодействия в восстановительной обстановке приводят к образованию серосодержащих газов на примере  $\text{CS}_2$  и  $\text{COS}$ :

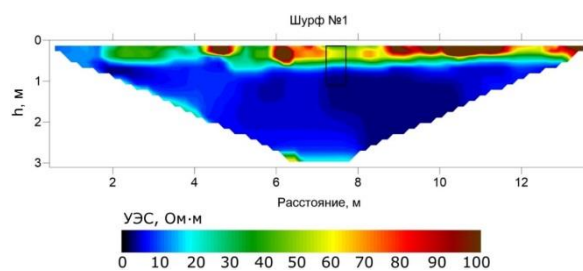


Стоит отметить, что непосредственно механизм данных реакций не до конца раскрыт и система  $\text{FeS}/\text{FeS}_2$  (равновесия 5, 6) является важным участником абиогенной продукции  $\text{CS}_2$  и  $\text{COS}$ , что подтверждается снижением количества генерируемых газов

при переходе от пирита к другим сульфидным минералам [28], и её можно рассматривать не только как восстановительную систему для запуска реакций (7)–(11), но и катализатор для этих реакций.

Возрастание концентраций газов к поверхности, по-видимому, объясняется двумя причинами: во-первых, идет закономерное накопление поднимающихся снизу газов; во-вторых, в наиболее прогреваемом слое (20–30 см от поверхности) реакции газообразования идут более интенсивно, в том числе усиливается бактериальная активность; в-третьих, в поверхностном слое возможно усиление процессов газогенерации под действием УФ-излучения [32].

В геоэлектрической зональности вещества наиболее низкое удельное электрическое сопротивление (УЭС) обнаруживается в нижних горизонтах, распространяется до глубины зондирования 3 м и продолжается ниже (рис. 4).



**Рис. 4.** Геоэлектрическая зональность вещества по линии шурфа № 1

**Fig. 4.** Geoelectric zoning of matter along the line of the pit no. 1

Это означает, что кислые растворы с высокими концентрациями растворенных форм элементов распространяются в грунтовые воды, где они могут мигрировать в разных направлениях в зависимости от гидрологического режима территории. Вместе с тем газовые аномалии в приземном слое воздуха определяются главным образом взаимодействиями в верхних частях разреза, но определенный вклад в их суммарную концентрацию вносят мигрирующие снизу газы. Основным фактором, влияющим на интенсивность газообразования, является температура среды,

при повышении которой более интенсивно идут неорганические реакции и функционируют бактериальные сообщества – продуценты обсуждаемых газов.

На втором разрезе (шурф № 4) выявилось ещё более контрастное проявление процессов перераспределения вещества и кислотообразования. В верхних

слоях разреза, представленных мелкозернистым веществом отходов, значения pH паст и водных вытяжек находились в нейтральной-слабощелочной области, но резко снизились в нижележащих горизонтах с увеличением электропроводности (т. е. минерализации межпоровых растворов), как показано на рис. 5.

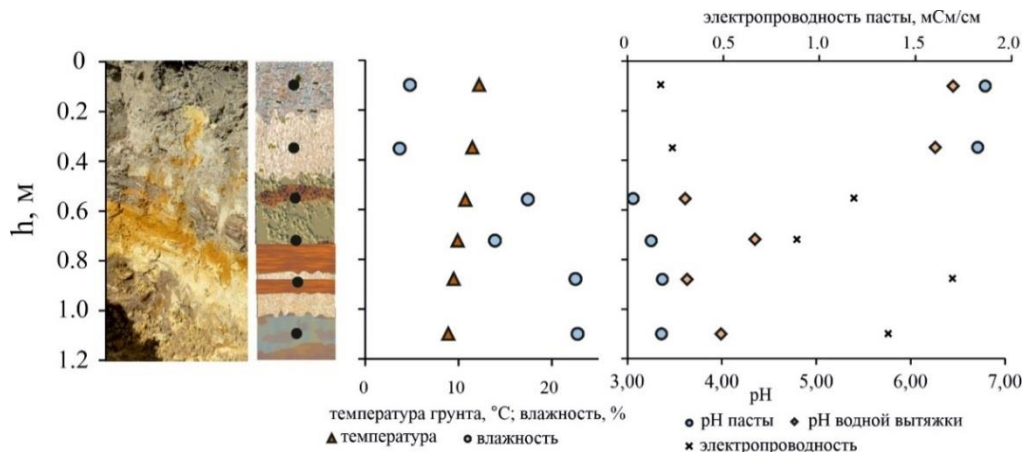


Рис. 5. Изменение параметров вещества хвостохранилища с глубиной (шурф № 4)

Fig. 5. Changes in the parameters of the tailing dump matter with depth (pit no. 4)

Распределение металлов по разрезу в твердом веществе не закономерно и, очевидно, зависит от первичной неоднородности вещества при складировании отходов (рис. 6). Однако так же, как разрезе шурфа № 1, накопление подвижных форм элементов

увеличивается книзу. Распределение мышьяка по данным анализа водных вытяжек также отличается от распределения металлов, что определяется различием продуктов реакций при окислении сульфидов (1)–(4).

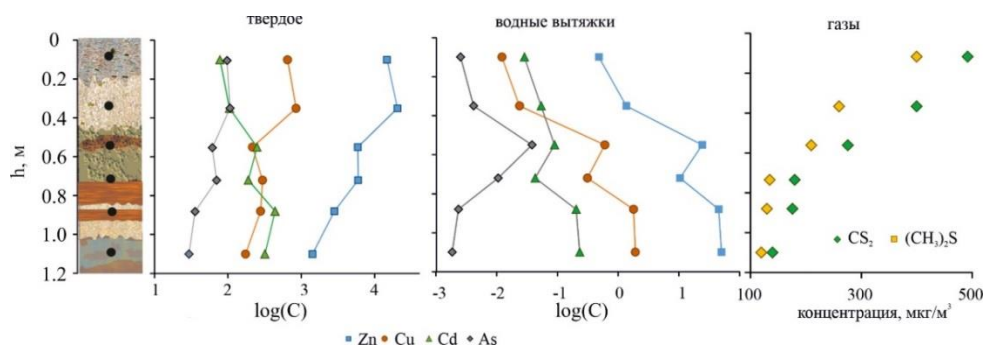


Рис. 6. Распределение общих концентраций металлов, их подвижных форм и некоторых газов по вертикали (шурф № 4). Примечание:  $\log(C)$  – десятичный логарифм содержания элемента, выраженного в мг/л и в г/т в воде и в твердом веществе, соответственно

Fig. 6. Vertical distribution of total concentrations of metals, their mobile forms and some gases (pit no. 4). Note:  $\log(C)$  is the decimal logarithm of the element content, expressed in mg/l and g/t in water and solid, respectively

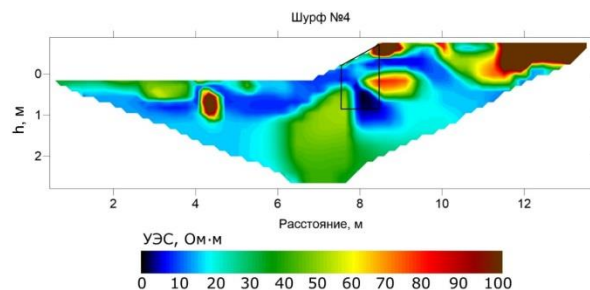


Рис. 7. Геоэлектрическая зональность вещества по линии шурфа № 4

Fig. 7. Geoelectric zoning of matter along the line of the pit no. 4

Геоэлектрическая зональность этого разреза полностью согласуется с изменением геохимических параметров вещества. Верхняя часть профиля представлена горизонтами с высоким УЭС (рис. 7), это слои с нейтральной средой и низкой минерализацией поровых растворов (рис. 5). Затем, при переходе в кислую область, УЭС разреза резко снижается и в забое шурфа становится близким к 1 (рис. 7).

При этом генерация газов, продуцируемых как неорганическими реакциями (сероуглерода), так и формирующихся при участии бактерий (диметилсульфида), наиболее высока в верхних слоях с нейтральной реакцией среды и высокими УЭС. Отметим, что в

данном разрезе в нейтральных горизонтах (рН паст 6,7) концентрация  $CS_2$  в несколько раз выше, чем в верхних слоях шурфа № 1, представленных веществом с кислой средой (рН паст 2,4).

В результате активных взаимодействий в веществе отходов и перехода химических элементов в подвижные формы, а также концентрирования за счет испарения воды, водоёмы, сформированные на поверхности отходов, содержат высокие количества многих компонентов. Вода реки характеризуется существен-

но более низкими концентрациями элементов по сравнению с водоёмами, но многие из них превышают фоновые значения в 3–8 раз ( $SO_4^{2-}$ , Ca, Cr, Mn, Zn, Pb, Sr), а в некоторых точках концентрации элементов превышают предельно допустимые концентрации вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК<sub>рх</sub>) [33]:  $SO_4^{2-}$ , Ca, Sr, Cd – в водоёмах; Al, Mn, Fe, Zn, Pb – на всем опробованном интервале реки (таблица). На рис. 8 приведены аномалии некоторых из обсуждаемых компонентов.

**Таблица.** Состав воды реки Малая Талмовая, водоёмов на поверхности хвостохранилища в сравнении с фоновыми концентрациями для рек Западной Сибири, электропроводность УЭП в мкСм/см  $HCO_3^-$  - Cu в мг/л, Pb – U в мкг/л

**Table.** Water composition of the Malaya Talmovaya River, water bodies on the tailings surface in comparison with background concentrations for the rivers of Western Siberia, electrical conductivity EC in  $\mu S/cm$   $HCO_3^-$  - Cu in mg/l, Pb-U in  $\mu g/l$

Элементы Elements	Вода р. М. Талмовая Water of the Malaya Talmovaya River				Водоёмы на хвостохранилище Water bodies on the tailings surface			Фон для рек Западной Сибири Background for the rivers of Western Siberia		ПДК <sub>рх</sub> MAC [33]
	мин min	макс max	среднее mean	ст. откл. st. dev.	МТ-3/20	МТ-5/20	МТ-5/20	[34, 35]		
рН	7,15	8,53	8,01	0,40	3,46	7,34	7,13	7,64	7,6	
УЭП/ЕС	182,3	291	212	34	3780	1214	922	нд/nd	нд/nd	
$HCO_3^-$	210	260	236	13	н.о./bdl	250	190	360	126	
$SO_4^{2-}$	54	60	57	1,9	2500	990	700	3,6	15	100
Cl <sup>-</sup>	5,1	6,0	5,3	0,27	1,6	2,04	2,8	3,3	6,3	300
$NO_3^-$	5,6	7,0	6,3	0,38	<0,5	<0,5	<0,5	0,4	2,4	40
$PO_4^{3-}$	0,0088	0,077	0,044	0,020	1,9	0,076	0,11	нд/nd	0,20	0,05
Br <sup>-</sup>	0,042	0,065	0,054	0,0085	0,037	0,070	0,073	0,036	нд/nd	1,35
I <sup>-</sup>	0,015	0,023	0,018	0,0026	0,0010	0,029	0,013	нд/nd	нд/nd	0,4
$HCOO^-$	0,30	0,44	0,37	0,05	<0,1	0,4	0,6	нд/nd	нд/nd	нд/nd
$CH_3COO^-$	0,80	1,6	1,3	0,25	<0,5	<0,5	<0,5	нд/nd	нд/nd	нд/nd
$NH_4^+$	0,41	0,52	0,47	0,032	1,5	1,3	1,6	0,53	нд/nd	0,5
$Ca^{2+}$	84	95	88	4,0	460	500	305	89	32	180
$Mg^{2+}$	8,9	9,7	9,2	0,28	200	55	36	14	6,9	40
$Na^+$	8,7	9,8	9,2	0,36	8,3	14	12	11	10	120
$K^+$	1,1	1,7	1,3	0,18	5,6	1,9	2,8	1,4	1,6	50
Si	3,4	3,7	3,5	0,11	32	4,4	2,3	4,8	2,5	нд/nd
Fe	0,20	0,3	0,24	0,030	794	1,3	0,85	5,3	1,0	0,1
Mn	0,070	0,16	0,12	0,029	78	30	15	нд/nd	0,019	0,05
Al	0,014	0,25	0,085	0,0811	67	0,13	0,23	0,083	нд/nd	0,04
Ba	0,056	0,064	0,060	0,0023	0,005	0,011	0,014	0,036	0,047	0,74
Sr	0,30	0,32	0,31	0,0060	0,33	0,63	0,50	0,15	0,19	0,4
Zn	0,12	0,19	0,15	0,021	1180	21	64	0,012	0,030	0,01
Cu	0,0046	0,0072	0,0054	0,0007	41	0,075	0,12	0,0008	0,0023	0,001
Pb	4,1	6,4	5,4	0,72	290	110	44	0,7	0,8	6,0
Cd	0,42	0,60	0,54	0,061	2300	60	198	0,12	0,24	5,0
Cr	6,3	13	11	2,3	60	14	15	5,1	2,8	70
Co	0,38	0,49	0,44	0,039	340	44	24	0,32	0,60	10
Ni	0,63	1,1	0,92	0,14	827	30	51	1,4	1,0	10
As	1,9	2,2	2,1	0,14	32	0,8	0,9	0,16	нд/nd	50
Sb	0,50	0,65	0,57	0,053	0,34	0,59	1,0	0,07	0,4	нд/nd
Se	0,17	0,70	0,43	0,21	34	1,8	4,2	нд/nd	нд/nd	2,0
Mo	0,67	1,1	0,77	0,14	0,93	0,30	0,52	нд/nd	нд/nd	1,0
V	0,38	0,52	0,44	0,045	6,3	0,030	0,037	нд/nd	нд/nd	1,0
U	1,1	1,2	1,2	0,032	117	1,8	0,78	0,67	0,51	нд/nd

Примечание/Note: нд – нет данных/nd – no data; н.о. – ниже предела обнаружения/bdl – below detection limit

Существенной разницы между концентрациями всех рассматриваемых веществ (Mn, Cd, Zn,  $SO_4^{2-}$ ) в реке до взаимодействия с отходами и после этого нет (рис. 8). Возможно, это связано с установлением состояния, при котором незначительно поступление в водоток различных соединений из отходов, непосредственно взаимодействующих с водой.

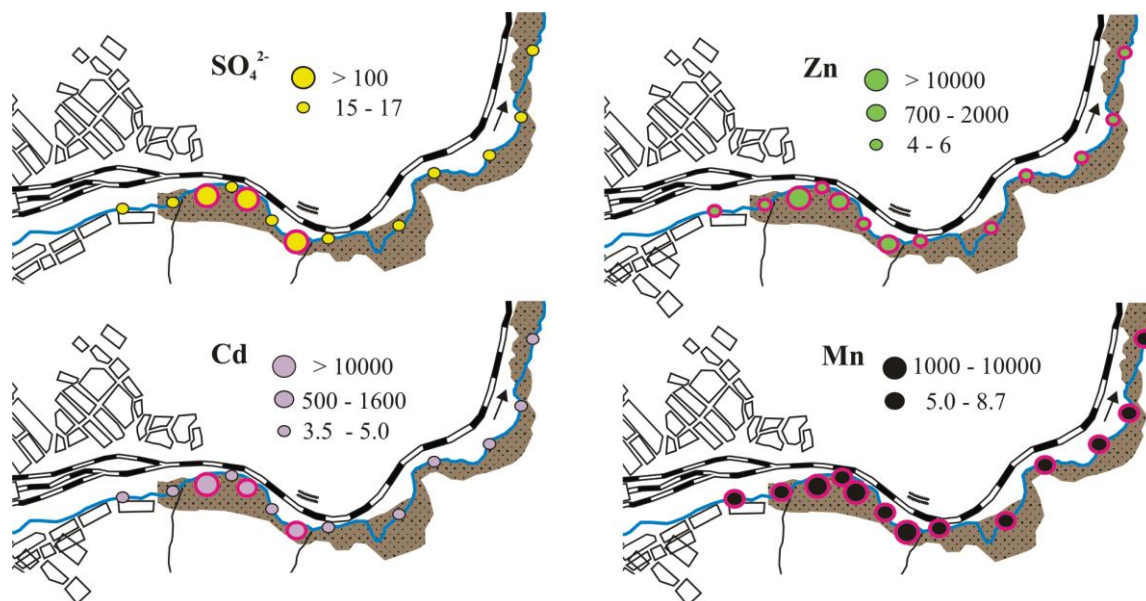
Отметим, что превышение над ПДК<sub>рх</sub> установлено в воде реки для Al и Cu практически в каждой точке,

над фоновыми значениями – только в водоёмах. Но для этих элементов разработанные нормативы ПДК<sub>рх</sub> ниже, чем фоновые значения: по Al – 0,083 [34], ПДК<sub>рх</sub> – 0,04 мг/л [33]; по Cu фон 0,0023 [35], ПДК<sub>рх</sub> – 0,001 мг/л [33]. Поэтому обсуждение аномалий этих элементов здесь не приводится. При этом существование водоёмов с концентрациями элементов, намного превышающими их фоновые значения и ПДК<sub>рх</sub>, означает возможность поступления этих растворов с



сезонными потоками в реку. Состав воды реки не является постоянным, изменение метеорологических условий может привести к существенному возрастанию

концентраций многих токсичных компонентов, которые накапливаются в водоёмах вследствие описанных выше процессов.



**Рис. 8.** Превышение концентраций некоторых элементов в воде р. М. Талмовой и в водоёмах на поверхности отходов над фоновыми значениями. Красным обведены точки, в которых содержание элемента превышает ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения

**Fig. 8.** Excess concentration of some elements in the water of the river. M. Talmova and in water bodies on the surface of waste above clark values. The points in which the content of the element exceeds the MPC of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance are circled in red

### Заключение

Обобщенная зональность техногенного тела на примере хвостохранилища Талмовские Пески может быть представлена следующим образом. В верхнем, прогреваемом, горизонте идёт интенсивное преобразование минеральной матрицы отходов и взаимодействие микробиоты с техногенным веществом, в результате которых накапливаются и формируются газы неорганического и биотического происхождения, в данном случае – сероуглерод и диметилсульфид. Наиболее интенсивно газообразование идет в веществе с нейтральной средой. Окисление и разрушение вещества в верхних слоях приводят к переходу металлов в поровый раствор. Ниже по разрезу, с увеличением влажности температура снижается, возрастает кислотность, а биотические реакции становятся менее активными, но возрастает роль неорганических взаимодействий. Условия для процессов разрушения минеральной матрицы и накопления элементов в растворе тем стабильнее, чем глубже располо-

жен горизонт, что следует из распределения валовых и растворённых форм элементов. К растворам, формирующимся *in situ* в глубоких горизонтах, добавляются растворы, фильтрующиеся сверху. Если образующиеся газы уходят по межпоровым путям кверху, то металлы с растворами концентрируются внизу.

В результате в р. Малая Талмовая, протекающей в непосредственной близости от хвостохранилища, и в водоёмах на поверхности отходов сформированы контрастные гидрохимические аномалии по многим компонентам: сульфат-ионам и металлам, концентрации которых достигают высоких значений (мг/л):  $SO_4^{2-}$  – 2500; Zn – 1200; Mn – 78; Cd – 2,3. Наличие водоёмов с высокоминерализованными растворами может приводить к залповым выносам токсикантов в реку в дождливое время или в период снеготаяния.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-17-00134).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Salomons W. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention // *Journal of Geochemical exploration*. – 1995. – V. 52. – № 1–2. – P. 5–23.
2. Akcil A., Koldas S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies // *Journal of cleaner production*. – 2006. – V. 14. – № 12–13. – P. 1139–1145.
3. Lottermoser B.G. Mine wastes. Characterization, treatment, environmental impacts. 2nd ed. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 335 p.
4. Hudson-Edwards K.A., Jamieson H.E., Lottermoser B.G. Mine wastes: past, present, future // *Elements*. – 2011. – V. 7. – № 6. – P. 375–380.
5. Skousen J.G., Ziemkiewicz P.F., McDonald L.M. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies // *The Extractive Industries and Society*. – 2019. – V. 6. – № 1. – P. 241–249.
6. Ofori-Sarpong G., Amankwah R. Potential of mine waste rock to generate acid mine drainage – a case study in south-western Ghana // *New Frontiers in Natural Resources Management in Africa*. – Cham: Springer, 2019. – P. 79–91.
7. Chandra A.P., Gerson A.R. The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: a fundamental perspective // *Surface Science Reports*. – 2010. – V. 65. – № 9. – P. 293–315.
8. Corkhill C.L., Vaughan D.J. Arsenopyrite oxidation – a review // *Applied Geochemistry*. – 2009. – V. 24. – № 12. – P. 2342–2361.

9. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain / L. Rodríguez, E. Ruiz, J. Alonso-Azcárate, J. Rincón // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – V. 90. – № 2. – P. 1106–1116.
10. Ecological and health risks of heavy metal on farmland soils of mining areas around Tongling City, Anhui, China / Z. Shen, D. Xu, L. Li, J. Wang, X. Shi // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – V. 26. – № 15. – P. 15698–15709.
11. Gyamfi E., Appiah-Adjei E.K., Adjei K.A. Potential heavy metal pollution of soil and water resources from artisanal mining in Kokoteasua, Ghana // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2019. – V. 8. – P. 450–456.
12. Minnaar A. Water pollution and contamination from gold mines: acid mine drainage in Gauteng Province, South Africa // *Water, Governance, and Crime Issues*. – Cham: Springer, 2020. – P. 193–219.
13. Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // *Applied Geochemistry*. – 2011. – V. 26. – № 11. – P. 1777–1791.
14. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region, Russia) / S. Bortnikova, V. Olenchenko, O. Gaskova, N. Yurkevich, N. Abrosimova, E. Shevko, A. Edelev, T. Korneeva, I. Provornaya, L. Eder // *Applied Geochemistry*. – 2018. – V. 93. – P. 145–157.
15. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste / S. Bortnikova, N. Yurkevich, A. Devyatova, O. Saeva, O. Shuvaeva, A. Makas, M. Troshkov, N. Abrosimova, M. Kirillov, T. Korneeva, T. Kremleva, N. Fefilov, G. Shigabaeva // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 647. – P. 411–419.
16. Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings / S.B. Bortnikova, N.V. Yurkevich, N.A. Abrosimova, A.Y. Devyatova, A.V. Edelev, A.L. Makas, M.L. Troshkov // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – V. 186. – P. 256–269.
17. Sulfur and nitrogen gases in the vapor streams from ore cyanidation wastes at a sharply continental climate, Western Siberia, Russia / N. Yurkevich, S. Bortnikova, N. Abrosimova, A. Makas, V. Olenchenko, Nik. Yurkevich, A. Edelev, O. Saeva, A. Shevko // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 2019. – V. 230. – № 12. – P. 307–319.
18. The combination of geoelectrical measurements and hydrogeochemical studies for the evaluation of groundwater pollution in mining tailings areas / S. Bortnikova, N. Yurkevich, E. Bessonova, Y. Karin, O. Saeva // *Threats to the Quality of Groundwater Resources. The Handbook of Environmental Chemistry*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. – V. 40. – P. 239–256.
19. Лабазин Г.С. Структурно-морфологические особенности полиметаллических месторождений Салаирских рудников и геологические условия их нахождения // *Цветные металлы*. – 1940. – № 3. – С. 14–20.
20. Зеркалов В.И. Минералогия и геология колчеданных медно-свинцово-цинковых месторождений северо-восточного Салаира: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1962. – 20 с.
21. Поспелов Г.Л., Лапухов А.С. Строение и развитие рудообразующих флюидных динамических систем с полиморфной зональностью (на примере Салаирского рудного поля) // *Физико-химические и геохимические процессы в динамических рудообразующих системах*. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 8–55.
22. Лапухов А.С. Зональность колчеданно-полиметаллических месторождений. – Новосибирск: Наука, 1975. – 264 с.
23. Дистанов Э.Г. Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири. – Новосибирск: Наука, 1977. – 351 с.
24. Бортникова С.Б. Геолого-геохимические особенности золотого оруденения в полиметаллических полях северо-восточного Салаира: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 1989. – 206 с.
25. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2006. – 170 с.
26. Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys. – Austin: Advanced Geosciences Inc., 1999. – 61 p.
27. Sobek A.A. Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. – USA: Industrial Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1978. – 203 p.
28. Taylor C.H., Kesler S.E., Cloke P.L. Sulfur gases produced by the decomposition of sulfide minerals: Application to geochemical exploration // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1982. – V. 17. – P. 165–185.
29. Hinkle M.E., Lovell J.S. Sulphur gases // *Handbook of Exploration Geochemistry*. – Amsterdam: Elsevier Science BV, 2000. – V. 7. – P. 249–289.
30. Heinen W., Lauwers A. M. Organic sulfur compounds resulting from the interaction of iron sulfide, hydrogen sulfide and carbon dioxide in an anaerobic aqueous environment // *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. – 1996. – V. 26. – № 2. – P. 131–150.
31. Rickard D., Luther G.W. Chemistry of iron sulfides // *Chemical reviews*. – 2007. – V. 107. – № 2. – P. 514–562.
32. Photochemical production of carbonyl sulfide, carbon disulfide and dimethyl sulfide in a lake water / Q. Du, Y. Mu, C. Zhang, J. Liu, Y. Zhang, C. Liu // *Journal of Environmental Sciences*. – 2017. – V. 51. – P. 146–156.
33. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». // Официальный интернет-портал правовой информации. 2020. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006160052/> (дата обращения 20.10.2020).
34. Колубаева Ю.В., Шварцев С.Л., Копылова Ю.Г. Геохимия вод северной части Кольвань-Томской складчатой зоны // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2010. – № 2. – С. 50–58.
35. Эколого-геохимическое состояние речных вод Средней Сибири / С.Л. Шварцев, О.Г. Савичев, Г.Г. Вертман, Р.Ф. Зарубина, Н.Г. Наливайко, Н.Г. Трифонова, Ю.П. Туров, Л.Ф. Фризен, В.В. Янковский // *Водные ресурсы*. – 1996. – Т. 23. – № 6. – С. 723–731.

Поступила 09.12.2020 г.

#### Информация об авторах

**Бортникова С.Б.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующая лабораторией геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Юркевич Н.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Еделев А.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Саева О.П.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Грахова С.П.**, научный сотрудник, лаборатория геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Волынкин С.С.**, младший научный сотрудник, лаборатория геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Карин Ю.Г.**, научный сотрудник, лаборатория геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 550.837.312:556.531.4

## HYDROCHEMICAL AND GASEOUS ANOMALIES ON SULFIDE TAILINGS (SALAIR, KEMEROVO REGION)

**Svetlana B. Bortnikova<sup>1</sup>,**  
BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

**Nataliya V. Yurkevich<sup>1</sup>,**  
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Aleksey V. Edelev<sup>1</sup>,**  
EdelevAV@ipgg.sbras.ru

**Olga P. Saeva<sup>1</sup>,**  
SaevaOP@ipgg.sbras.ru

**Sofiya P. Grakhova<sup>1</sup>,**  
GrakhovaSP@ipgg.sbras.ru

**Sergey S. Volynkin<sup>1</sup>,**  
VolynkinSS@ipgg.sbras.ru

**Yuriy G. Karin<sup>1</sup>,**  
KarinYG@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
3, Koptuyg avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research consists in obtaining data on the processes occurring in the sulfide mine waste, their transformation under the influence of oxidative factors, migration of toxic components into the environment.

**The main aim** of the research is to determine the vertical zoning by elemental composition and content of gases (carbon disulfide and dimethyl sulfide) in the tailings, as well as to establish the hydrochemical anomalies in the nearest river as a result of migration of potentially toxic elements with water flows from the tailings.

**Object** of the research is the abandoned tailings dump of the Salair mining and processing plant – Talmovskie Peski (Salair, Kemerovo region), containing wastes of cyanidation and flotation of barite-polymetallic ores.

**Methods.** In the field, thermometry, gas analysis, electric exploration by the resistance method in the electrotomography mode were carried out. Solid and liquid sampling was carried out in accordance with generally accepted techniques. The laboratory study of the chemical composition was carried out by the methods of conductometry, potentiometry, capillary electrophoresis, and mass spectrometry with inductively coupled plasma.

**Results.** The vertical distribution of the total element concentrations is determined by the heterogeneity of the stored tailings material. Using the example of two cross sections to a depth of 1,2 m, it was determined that the humidity of the substance increases with depth, and the temperature, pH pastes and aqueous extracts decrease. With depth, the amount of water-soluble species of metals increases due to the transformation of sulfides in acidic conditions, as well as due to the inflow from the upper horizons. The gas generation of carbon disulfide and dimethyl sulfide increases towards the upper layers of the tailings, which is due to the both transformation of minerals, and active functioning of biota in the upper heated layers with a neutral reaction of the medium. As a result of active tailings-water-gas interactions, contrasting hydrochemical anomalies with high metal concentrations are formed in the Malaya Talmovaya River, in the channel of which the tailing dump is located.

### Key words:

Tailings, emission of gases, micro-electrical tomography, sulfur gases, natural water pollution, electrical resistivity, acidic waters.

*This work was supported by the Russian Science Foundation [19–17–00134].*

### REFERENCES

- Salomons W. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical exploration*, 1995, vol. 52, no. 1–2, pp. 5–23.
- Akcil A., Koldas S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of cleaner production*, 2006, vol. 14, no. 12–13, pp. 1139–1145.
- Lottermoser B.G. *Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental Impacts*. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. 335 p.
- Hudson-Edwards K.A., Jamieson H.E., Lottermoser B.G. Mine wastes: past, present, future. *Elements*, 2011, vol. 7, no. 6, pp. 375–380.
- Skousen J.G., Ziemkiewicz P.F., McDonald L.M. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. *The Extractive Industries and Society*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 241–249.
- Ofori-Sarpong G., Amankwah R. Potential of mine waste rock to generate acid mine drainage—a case study in South-Western Ghana. *New Frontiers in Natural Resources Management in Africa*. Cham, Springer, 2019. pp. 79–91.
- Chandra A.P., Gerson A.R. The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: a fundamental perspective. *Surface Science Reports*, 2010, vol. 65, no. 9, pp. 293–315.
- Corkhill C.L., Vaughan D.J. Arsenopyrite oxidation – a review. *Applied Geochemistry*, 2009, vol. 24, no. 12, pp. 2342–2361.
- Rodríguez L., Ruiz E., Alonso-Azcárate J., Rincón J. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain. *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90, no. 2, pp. 1106–1116.
- Shen Z., Xu D., Li L., Wang J., Shi X. Ecological and health risks of heavy metal on farmland soils of mining areas around Tongling City, Anhui, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no. 15, pp. 15698–15709.
- Gyamfi E., Appiah-Adjei E.K., Adjei K.A. Potential heavy metal pollution of soil and water resources from artisanal mining in Kokoasua, Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, 2019, vol. 8, pp. 450–456.
- Minnaar A. Water pollution and contamination from gold mines: acid mine drainage in Gauteng Province, South Africa. *Water, Governance, and Crime Issues*. Cham, Springer, 2020. pp. 193–219.
- Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Applied Geochemistry*, 2011, vol. 26, no. 11, pp. 1777–1791.
- Bortnikova S., Olenchenko V., Gaskova O., Yurkevich N., Abrosimova N., Shevko E., Edelev A., Korneeva T., Provornaya I.,

- Eder L. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region, Russia). *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 93, pp. 145–157.
15. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Komeeva T., Kremleva T., Fefilov N., Shigabaeva G. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 647, pp. 411–419.
  16. Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Abrosimova N.A., Devyatova A.Y., Edelev A.V., Makas A.L., Troshkov M.L. Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, vol. 186, pp. 256–269.
  17. Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich N., Edelev A., Saeva O., Shevko A. Sulfur and nitrogen gases in the vapor streams from ore cyanidation wastes at a sharply continental climate, Western Siberia, Russia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2019, vol. 230, Iss. 12, 307.
  18. Bortnikova S., Yurkevich N., Bessonova E., Karin Y., Saeva O. The combination of geoelectrical measurements and hydrogeochemical studies for the evaluation of groundwater pollution in mining tailings areas. *Threats to the Quality of Groundwater Resources. The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013. Vol. 40, pp. 239–256.
  19. Labazin G.S. Strukturno-morfologicheskie osobennosti polimetallicheskih mestorozhdeniy Salairskikh rudnikov i geologicheskie usloviya ikh nakhozhdeniya [Structural and morphological features of polymetallic deposits of the Salair mines and the geological conditions of their location]. *Cvetnye metally*, 1940, no. 3, pp. 14–20.
  20. Zerkalov V.I. *Mineralogiya i geologiya kolchedannykh medno-svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniy severo-vostochnogo Salaira*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Mineralogy and geology of pyrite copper-lead-zinc deposits of northeastern Salair. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1962. 20 p.
  21. Pospelov G.L., Lapukhov A.S. Stroenie i razvitie rudoobrazuyushchikh flyuidnykh dinamicheskikh sistem s polimorfnoy zonalnostyu (na primere Salairskogo rudnogo polya) [The structure and development of ore-forming fluid dynamic systems with polymorphic zoning (on the example of the Salair ore field)]. *Fizicheskie i fiziko-khimicheskie protsessy v dinamicheskikh rudoobrazuyushchikh sistemakh* [Physical and physicochemical processes in dynamic ore-forming systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1971. pp. 8–55.
  22. Lapukhov A.S. *Zonalnost kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy* [Zoning of colcheldno-polymetallic deposits]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. 264 p.
  23. Distanov E.G. *Kolchedanno-polimetallicheskie mestorozhdeniya Sibiri* [Pyrite-polymetallic deposits of Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 351 p.
  24. Bortnikova S.B. *Geologo-geokhimicheskie osobennosti zolotogo orudeneniya v polimetallicheskih polyakh severo-vostochnogo Salaira*. Dis. Kand. nauk [Geological and geochemical features of gold mineralization in polymetallic fields of northeastern Salair. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 1989. 20 p.
  25. Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Bessonova E.P. *Geokhimiya tekhnogennykh sistem* [Geochemistry of technogenic systems]. Novosibirsk, SO RAN Publ., branch «GEO», 2006. 170 p.
  26. Loke M.H. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Austin, Advanced Geosciences Inc., 1999. 61 p.
  27. Sobek A.A. *Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils*. USA, Industrial Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1978. 203 p.
  28. Taylor C.H., Kesler S.E., Cloke P.L. Sulfur gases produced by the decomposition of sulfide minerals: Application to geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 1982, vol. 17, pp. 165–185.
  29. Hinkle M.E., Lovell J.S. Sulphur gases. *Handbook of Exploration Geochemistry*. Vol. 7. Amsterdam, Elsevier Science BV, 2000. pp. 249–289.
  30. Heinen W., Lauwers A. M. Organic sulfur compounds resulting from the interaction of iron sulfide, hydrogen sulfide and carbon dioxide in an anaerobic aqueous environment. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 1996, vol. 26, no. 2, pp. 131–150.
  31. Rickard D., Luther G.W. Chemistry of iron sulfides. *Chemical reviews*, 2007, vol. 107, no. 2, pp. 514–562.
  32. Du Q., Mu Y., Zhang C., Liu J., Zhang Y., Liu C. Photochemical production of carbonyl sulfide, carbon disulfide and dimethyl sulfide in a lake water. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, vol. 51, pp. 146–156.
  33. *Prikaz Ministerstva selskogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13.12.2016 g. № 552 (red. ot 10.03.2020) «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh obektov rybkhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predelno dopustimyykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh obektov rybkhozyaystvennogo znacheniya»* [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of 13.12.2016 no. 552 (revised from 10.03.2020) «On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance»]. 2020. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006160052/> (accessed 20 October 2020).
  34. Kolubaeva Yu.V., Shvartsev S.L., Kopylova Yu.G. Water geochemistry of the north of Kolyvan–Tomsk folded zone. *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*, 2010, no. 2, pp. 50–58. In Rus.
  35. Shvartsev S.L., Savichev O.G., Vertman G.G., Zarubina R.F., Nalivaiko N.G., Trifonova N.G., Turov Yu.P., Frizen L.F., Yankovsky V.V. Ecological and geochemical state of river waters in Central Siberia. *Water resources*, 1996, vol. 23, no. 6, pp. 673–682.

Received: 9 December 2020.

#### Information about the authors

**Svetlana B. Bortnikova**, Dr.Sc., professor, head of the department, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

**Nataliya V. Yurkevich**, Cand. Sc., leading researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

**Aleksey V. Edelev**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

**Olga P. Saeva**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

**Sofiya P. Grakhova**, research associate, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

**Sergey S. Volynkin**, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

**Yuriy G. Karin**, research associate, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

УДК 622.24.622

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ БУРЕНИЯ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Третьяк Александр Александрович<sup>1</sup>,  
13050465@mail.ru

Яценко Елена Альфредовна<sup>1</sup>,  
tksiww@yandex.ru

Онофриенко Сергей Александрович<sup>1</sup>,  
13050465@mail.ru

Карельская Екатерина Витальевна<sup>1</sup>,  
karelskaya\_1992@mail.ru

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,  
Россия, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью решать экологические вопросы, возникающие при сооружении нефтяных и газовых скважин. Процесс идентификации отходов, образующихся при строительстве скважин, и использование их для нужд народного хозяйства являются актуальными задачами в настоящее время. Вопросы рециклинга бурового раствора включают в себя: разделение раствора на обезвоженную твердую фазу (буровой шлам) и дисперсную среду (буровой раствор); изготовление из бурового шлама различных видов сырья: повторное использование бурового раствора. С целью интенсификации процесса отделения бурового шлама от раствора предлагается использовать омагничивание. Предложена принципиальная схема очистки бурового раствора с использованием блока омагничивания. Установлено, что омагничивание бурового раствора способствует ускорению выпадения шлама из раствора. Предложена технология получения пропанта из бурового шлама с использованием попутного газа для обжига и мобильного комплекса, работающего непосредственно в полевых условиях, на месторождениях. В статье приведена принципиальная схема мобильной установки для переработки бурового шлама. Пропант, приготовленный из бурового шлама, предлагается использовать для гидроразрыва пласта на месторождениях, расположенных в этом районе. Предлагаемые разработки по рециклингу бурового раствора позволят решить проблему обращения с отходами непосредственно на участках буровых работ, что даст значительный экономический эффект для буровых компаний.

**Цель:** оценить вопросы рециклинга бурового раствора; решить вопросы по ускоренному отделению шлама от бурового раствора за счет использования магнитного поля; разработать мобильную установку для переработки бурового шлама с использованием для обжига пропанта попутного газа; на разработанную технологию получения пропанта из отходов бурения подать заявку на изобретение и получить патент.

**Объекты:** шлам, получаемый при сооружении скважин различного назначения.

**Методы.** Предложена технология ускоренного отделения шлама от бурового раствора, разработан мобильный универсальный комплекс для изготовления пропанта непосредственно в полевых условиях.

**Результаты.** Определены основные пути рециклинга бурового раствора, предложено устройство для омагничивания бурового раствора, для обжига пропанта предлагается использовать мобильный универсальный комплекс и попутный газ. Разработанная технология получения пропанта дает существенный экономический и экологический эффект.

### Ключевые слова:

Рециклинг бурового раствора, омагничивание, мобильная установка, шлам, пропант.

### Введение

В настоящее время экологические вопросы во всем мире становятся все более актуальными. В результате человеческой деятельности степень загрязнения окружающей среды достигла катастрофических масштабов. Как никогда остро стоят эти вопросы и в нефтегазовой отрасли.

Технология бурения нефтегазовых скважин обуславливает образование технологических отходов, таких как: буровой шлам, отработанный буровой раствор и буровые сточные воды. Наибольшую трудность представляет утилизация отработанных буровых растворов и шламов.

Рециклинг бурового раствора включает в себя: разделение раствора на обезвоженную твердую фазу (буровой шлам) и дисперсную среду (буровой раствор); изготовление из бурового шлама различных видов сырья, необходимого для производства; по-

вторное применение бурового раствора с целью сооружения скважин [1, 2].

Во многих странах, занимающихся бурением нефтегазовых скважин, используются различные методы рециклинга, или переработки образовавшихся при бурении скважин отходов с целью вторичного их использования для нужд производства.

Процесс идентификации или разделение отходов бурения на три основных вида: отработанный буровой раствор, буровой шлам и буровые сточные воды являются первостепенными технологическими задачами.

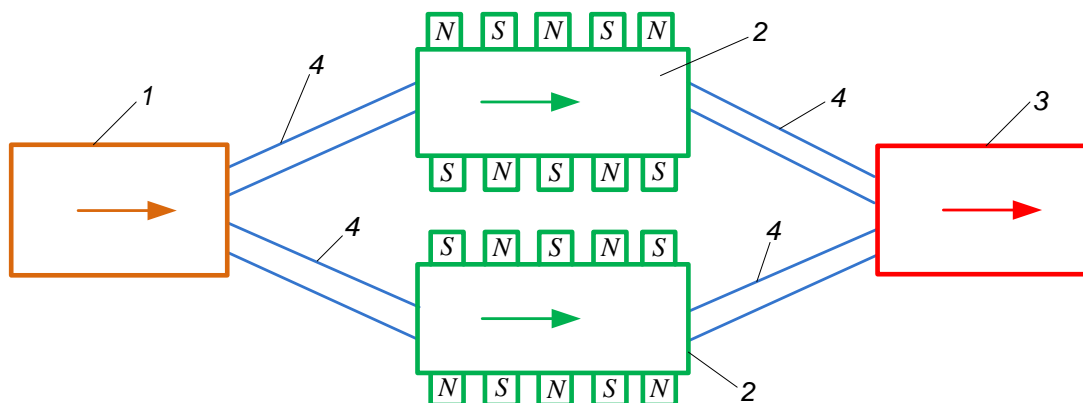
Объем отходов, образующихся при сооружении скважины, состоит из объема выбуренной породы и объема химреагентов и материалов, используемых при проводке скважины. В настоящее время до 80 % объема бурения приходится на глинистые породы. Выбуренные частицы пород в процессе гидротранс-

порта с забоя набухают, при этом объем шлама увеличивается на 20–25 %.

Многие буровые компании активно используют безамбарную технологию буровых работ с применением специальных емкостей. Традиционно используется четырехступенчатая очистка буровых растворов

(высокоэффективные вибросита, пескоотделители или ситогидроциклонные установки, шламоотделители, центрифуги) [3, 4].

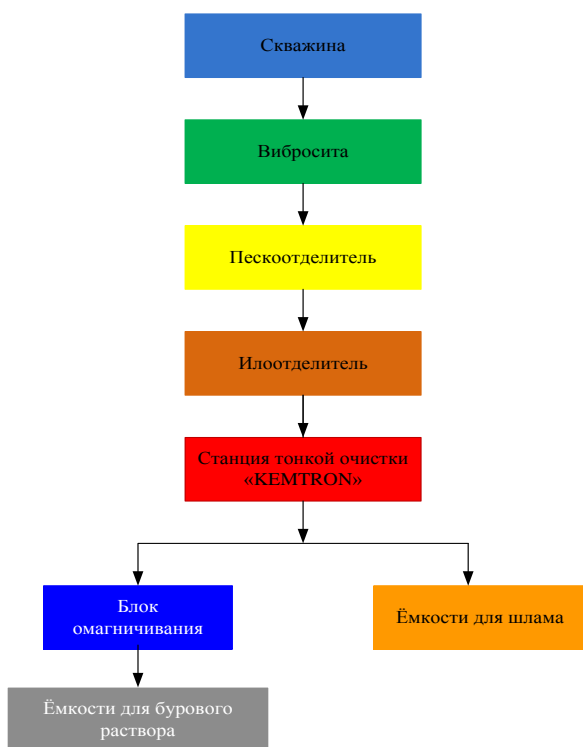
С целью интенсификации процесса отделения бурового шлама от раствора предлагается использовать блок омагничивания (рис. 1) [5, 6].



**Рис. 1.** Блок омагничивания промывочной жидкости: 1 – буровой насос; 2 – блок омагничивания; 3 – нагнетательный шланг; 4 – шланги

**Fig. 1.** Block for magnetizing flushing fluid: 1 – mud pump; 2 – magnetization block; 3 – delivery hose; 4 – hoses

Движение шлама от устья скважины до емкости для шлама показано на схеме очистки бурового раствора (рис. 2).



**Рис. 2.** Принципиальная схема очистки бурового раствора

**Fig. 2.** Schematic diagram of drilling mud cleaning

Подбор оптимальных реагентов для очистки обработанного бурового раствора и шлама является сложной технологической задачей.

#### Результаты проведения лабораторных исследований

Известно, что воздействие на буровой раствор различными физическими полями способствует ускоренному осадконакоплению [7, 8].

Определенный интерес представляет выявление зависимости магнитной обработки на скорость оседания частиц обработанной и необработанной промывочной жидкости. Для решения этой задачи в лабораторных условиях был смонтирован стенд, имитирующий циркуляционную систему скважины. Исследовали два типа промывочной жидкости: омагниченная и неомагниченная наноструктурированная, высокоингибированная. Опыты выполняли при магнитной напряженности до 3,0 тыс. Э, скорости пропускания жидкости 0,3 м/с, температуре до 45°C. Время эксперимента составляло 40 минут [9].

Экспериментальные исследования показывают, что при магнитной обработке раствора максимальная интенсивность выпадения в осадок глинистых частиц наблюдается в течение 40 минут, причем для омагниченного раствора интенсивность осадковывадения значительно выше, чем для неомагниченного.

Известно, что в глинистых породах присутствуют высокодисперсные ферромагнитные частицы. Это позволяет рассматривать буровой раствор как слабоферромагнитную систему.

Постоянное магнитное поле, очевидно, изменяет молекулярные Ван-дер-ваальсовы силы, поскольку они являются квантомеханическим эффектом, связанным с поведением электронов в атоме. При этом движение электронов и их энергия заметно изменяются при наложении магнитного поля. Превышение сил отталкивания над силами притяжения обуславливает возникновение силового барьера – начинается коагуляция частиц из раствора.

Действие магнитного поля на суспензии коллоидных частиц приводит к характерным эффектам, в основе которых лежит способность частиц приобретать под действием поля направленное движение относительно среды. Под действием магнитного поля коллоидный раствор структурируется.

При нарушении агрегативной устойчивости характер оседания коллоидного раствора по существу и внешне сильно меняется; оседают не отдельные частицы, а флоккулы, причем в силу взаимодействия в этот процесс вовлечены сразу все флоккулы, мелкие и круглые частицы.

Находящиеся в растворе крупные частицы являются центром коагуляции. Число соударений, приводящих к слипанию мелких частиц с крупными, зависит от концентрации их в единице объема раствора. При отсутствии магнитного поля мелкие коллоидные частицы не прилипают к крупным. В магнитном поле даже низкой напряженности происходит коагуляция всех высокодисперсных частиц. Так как частицы достаточно малы по массе, для их осаждения требуется продолжительное время. С ростом числа частиц уменьшается вероятность их соударений и прилипания к крупным частицам, поэтому эффективность магнитной обработки с увеличением напряженности магнитного поля уменьшается. Этим можно объяснить минимум эффективности при максимуме напряженности магнитного поля [10].

Глинистая частица, обладающая тем или иным магнитным моментом, в условиях внешнего магнитного поля, рассматривается как носитель электрического заряда [9].

В связи с этим процесс коагуляции должен рассматриваться, на наш взгляд, не только с позиции баланса энергии молекулярного, электростатического и теплового происхождения, но еще и магнитного.

Осаждения частиц шлама в растворе описывается уравнением [10]:

$$C \cdot r^j = \frac{H}{t} = V(r),$$

где  $V(r)$  – скорость оседания частиц с радиусом  $r$ ;  $C$  – константа;  $j$  – показатель степени (2, 1, 1/2);  $H$  – напряженность магнитного поля, Э;  $t$  – время, ч.

Моделирование процесса осадкообразования практически невозможно в силу большой сложности этого явления, поэтому природа осадкообразования может быть изучена только путем следования «от частного к общему», при учете известных закономерностей. При выполнении экспериментальных работ пришлось поступить так, как обычно поступают в этом случае, – принимать значения других факторов постоянными и одинаковыми и исследовать при этом зависимость от интересующего нас фактора. В данном случае изучалась статистическая зависимость между напряженностью магнитного поля и содержанием глинистых частиц, выпавших в осадок.

Проведенные эксперименты позволили выявить ряд интересных закономерностей, а главное – дали возможность разобраться в природе наблюдаемых эффектов – почему омагниченный буровой раствор

способствует увеличению осадконакопления шлама, что является важным моментом в технологии сооружения нефтегазовых скважин.

Определенный интерес представляет влияние магнитной обработки на скорость оседания частиц обработанной и необработанной промывочной жидкости. Для решения этой задачи в лабораторных условиях был смонтирован стенд, имитирующий циркуляционную систему скважины. Исследовали два типа бурового раствора: омагниченный и неомагниченный наноструктурированный, высокоингибированный (патент RU № 2708849) [8].

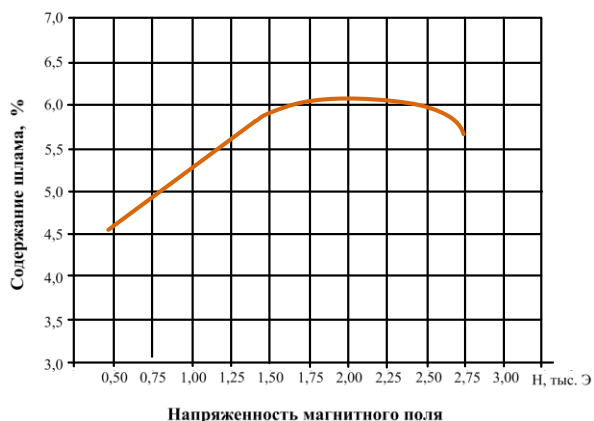
Осаждение глинистых частиц, после воздействия магнитного поля, наблюдали визуально и с помощью прибора ОМ-2. В каждом опыте производились наблюдения за интенсивностью коагуляции по характеру хлопьеобразования и просветлению осадка, его макроструктурными особенностями, трещиноватостью осадков, возникшей в результате сушки, за смещением частиц относительно вертикали и направлением внешнего магнитного поля. Опыты показали, что прозрачность неосевшей части суспензии различна. Так, в поле 1,0 тыс. Э она оказалась меньшей, чем в поле 2,0 тыс. Э, а осадок приобрел горизонтально-волнистую слоистость. Кроме того, мощность осадка в сильном магнитном поле значительно больше.

Каждую глинистую частицу можно рассматривать как микрообъект, находящийся в броуновском движении, перемещающийся с определенной скоростью в любом направлении и одновременно движущийся поступательно вниз. Нами наблюдалось смещение глинистых частиц в виде прилипших агрегатов на стенке цилиндра, что приводило к образованию наклонной слоистости. Полученная глинистой частицей величина ускорения является условной, так как частица находится в сложном тепловом движении, обладает оптимальной скоростью, подчиняется смещающему действию магнитного поля.

Анализ наблюдений за омагниченным наноструктурированным, высокоингибированным раствором позволяет сделать следующие выводы: а) наличие ферромагнитного компонента наблюдается в виде бурых скоплений на стенках цилиндра в районе полюсов магнита; б) коагуляция раствора зависит от напряженности магнитного поля; в) максимальная мощность зоны просветления наблюдается при напряженности 2,0 тыс. Э (рис. 3).

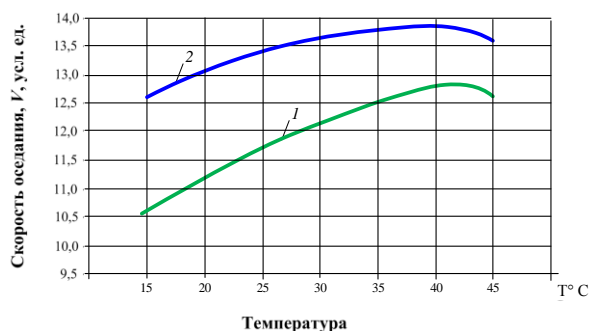
Экспериментальными исследованиями было установлено оптимальное время (40 минут) и эффективная температура осадконакопления (40 °С) (рис. 4, 5).

Оценив выполненные эксперименты, можно утверждать: состав наноструктурированного, высокоингибированного бурового раствора оказывает существенное влияние на его магнитные свойства, частицы шлама различного состава содержат различное количество ферромагнетиков, этим можно объяснить его влияние на магнитные эффекты; воздействие магнитного поля увеличивает скорость осаждения частиц шлама из раствора, повышение температуры влияет на скорость осаждения частиц шлама из бурового раствора; в течение 40 минут основная масса шлама выпадает в осадок.



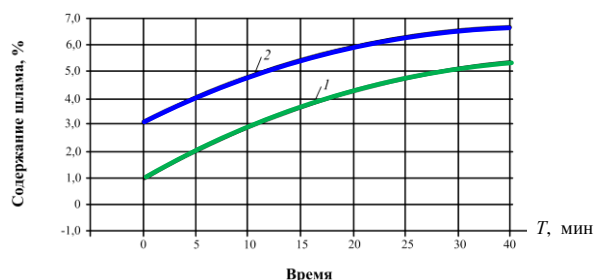
**Рис. 3.** Зависимость процентного содержания шлама, выпавшего в осадок в течение 40 минут, от напряженности магнитного поля

**Fig. 3.** Dependence of the percentage of sludge deposited in the sediment during 40 minutes, on magnetic field strength



**Рис. 4.** Зависимость скорости оседания глинистых частиц наноструктурированного, высокоингибированного бурового раствора от температуры: 1 – до омагничивания, 2 – после омагничивания

**Fig. 4.** Dependence of the sedimentation rate of clay particles of nanostructured, highly inhibited drilling fluid on temperature: 1 – before magnetization, 2 – after magnetization



**Рис. 5.** Зависимость процентного содержания шлама, выпавшего в осадок из наноструктурированного, высокоингибированного бурового раствора, от времени: 1 – до омагничивания, 2 – после омагничивания

**Fig. 5.** Dependence of the percentage of cuttings precipitated from the nanostructured, highly inhibited drilling fluid from time to time: 1 – before magnetization, 2 – after magnetization

Использование блока омагничивания промывочной жидкости с напряженностью постоянного маг-

нитного поля до 3 тысяч эрстед позволило добиться, при экспериментальных исследованиях, увеличения скорости осаждения частиц шлама до двух раз.

По химическому составу отходы могут быть: глинистые, карбонатные, галоидносульфатные. Буровые компании используют различные методы утилизации буровых растворов, в частности [11, 12]:

- 1) для бурения новых скважин;
- 2) регенерация компонентов бурового раствора путём получения из него глинопорошка удовлетворительного качества и некоторых химических реагентов;
- 3) использованные в качестве добавок к тампонажным материалам;
- 4) физико-химическая нейтрализация и отверждение раствора и шлама.

При сооружении нефтегазовой скважины глубиной до 4000 м образуется до 600 м<sup>3</sup> бурового шлама. Утилизация, обеззараживание и переработка шлама в настоящее время являются серьезными экологическими проблемами не только для нашей страны, но и за рубежом. Средняя стоимость утилизации 1 м<sup>3</sup> бурового шлама в России составляет порядка 10000 рублей. Нами разработана технология получения пропанта из бурового шлама. Суть технологии заключается в следующем: полученный буровой шлам специальными химическими реагентами обеззараживается, добавляются химические добавки, окатыши из приготовленного шлама заданного диаметра обжигаются непосредственно на месторождении с использованием попутного газа.

Принципиальная схема универсального, перерабатывающего буровой шлам комплекса, смонтированного на шасси автомобиля высокой проходимости, показана на рис. 6 и включает следующее оборудование:

- 1) блок бурового шлама;
- 2) блок предварительной обработки шлама;
- 3) блок капсулирования шлама;
- 4) блок обжига шлама;
- 5) блок хранения пропанта.

Экономический эффект применения мобильной установки для изготовления пропанта достигается за счет:

- 1) отсутствия шламовых полигонов;
- 2) исключения затрат на транспортировку шлама на полигон захоронения;
- 3) уменьшения себестоимости изготовления пропанта за счет использования попутного газа разбуриваемого месторождения и изготовления пропанта на месторождении, а не на заводе;
- 4) рекультивации шламовых амбаров ранее пробуренных скважин;
- 5) выполнения гидроразрыва пласта с использованием пропанта, изготовленного на месторождении.

Для изготовления пропанта используются специальные химические добавки, повышающие прочность пропанта, разработана технология изготовления пропанта. Для обжига пропанта предлагается использовать мобильный универсальный комплекс с высокой степенью проходимости.



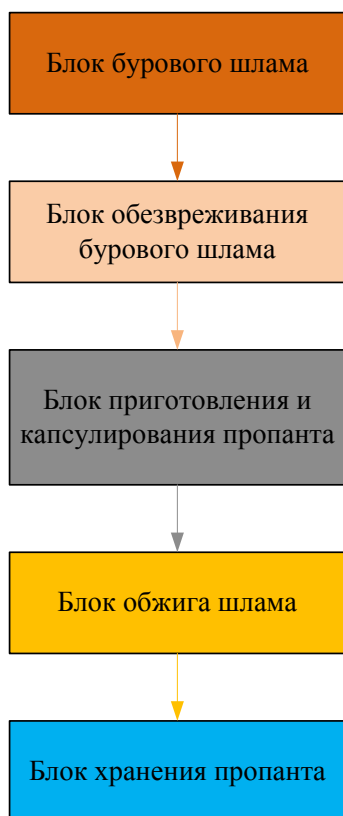


Рис. 6. Принципиальная схема мобильной установки для переработки бурового шлама

Fig 6. Schematic diagram of a mobile plant for processing drill cuttings

Процесс переработки отходов буровых работ можно разделить на следующие операции [13, 14]:

- загрузка шлама в блок бурового шлама из контейнеров;
- очистка и обезвреживания бурового шлама;
- добавка химреагентов в шлам, приготовление и капсулирование пропанта;
- обжиг пропанта при температуре до 1400 °С;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губа А.С., Плетнева Н.И., Явич М.Ю. Идентификация отходов бурения // Нефть, газ, новации. – 2019. – № 11. – С. 82–86.
2. Матвиенко В.В., Кузнецова В.А., Цеханский М.В. К вопросу о современных методах переработки и утилизации отходов бурения // Нефть и газ Сибири. – 2017. – № 3 (28). – С. 147–151.
3. Буровой раствор для строительства скважин в сложных условиях / А.А. Третьяк, Ю.М. Рыбальченко, С.И. Лубянова, Ю.Ю. Турунтаев, К.А. Борисов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 28–31.
4. Третьяк А.А., Рыбальченко Ю.М. Теоретические исследования по управлению буровым раствором в осложненных условиях // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. Приложение. – 2006. – № 7. – С. 56–61.
5. Осипов Ю.Б. Поведение глинистых суспензий в магнитном поле // Геология. – 1964. – Сер. № 4. – С. 15–19.
6. О некоторых особенностях влияния электромагнитного поля на движение ионов в потоке раствора / В.К. Погодин, Ю.Я. Голгер, В.И. Классен, П.А. Смыслов // Применение магнитной обработки воды в энергетике. Материалы Всесоюзного совещания. – Новосибирск, 1967. – С. 20–24.
7. Применение физических полей для регулирования свойств буровых растворов и тампонажных материалов /

- получение керамического пропанта с прочностью на сжатие до 50–55 МПа;
- складирование пропанта для хранения.

На разработанную технологию получения пропанта из отходов бурения подана заявка на изобретение. Таким образом, разработанная технология получения пропанта дает возможность получить существенный экономический и экологический эффект [15, 16].

В настоящее время в повестке дня буровых компаний довольно остро стоит вопрос переработки буровых отходов, особенно с учетом ужесточения экологических требований со стороны государственных служб. Предлагаемая технология получения пропанта основана на комплексном подходе, позволяющем решать вопросы утилизации шлама, сжигания попутного газа, производства пропанта на месте его применения, то есть на месторождении [17–20].

#### Выводы

1. Учитывая интенсивное развитие нефтегазодобывающей отрасли и ежегодное увеличение объема буровых работ, степень загрязнения окружающей среды будет увеличиваться.
2. Вопросы переработки и утилизации буровых отходов должны решаться с учетом требований законодательства.
3. Обработка промывочной жидкости в постоянном магнитном поле способствует ускоренному выпадению шлама из раствора в осадок.
4. Минералогический состав раствора оказывает существенное влияние на его магнитные свойства.
5. Переработка отходов, образующихся при строительстве скважин, в полезный продукт позволит не только решить экологические проблемы, но и может быть использована для различных целей.
6. Предлагаемые разработки по рециклингу бурового раствора позволят решить проблему обращения с отходами непосредственно на участках буровых работ, что даст значительный экономический эффект для буровых компаний.

- Н.М. Шерстнёв, С.П. Шандин, С.И. Толоконский, Н.О. Черская, А.В. Уголева // Российский химический журнал. – 1995. – № 5. – Т. 39. – С. 22–26.
8. Наноструктурированный, высокоингибированный буровой раствор: пат. Рос. Федерация, № 2708849, заявл. 24.01.19; опубл. 12.12.19. Бюл. № 35. – 8 с.
9. Высокоингибированный буровой раствор: пат. Рос. Федерация, № 2303047, заявл. 05.10.06; опубл. 20.07.07. Бюл. № 20. – 6 с.
10. Буровой раствор и управление его реологическими свойствами при бурении скважин в осложненных условиях / В.Ф. Чихоткин, А.Я. Третьяк, Ю.М. Рыбальченко, М.Л. Бурда // Бурение на нефть. – 2007. – № 7–8. – С. 58–60.
11. Caenn R., Darley H.C.H., Gray R.G. Chapter 14 – Drilling and Drilling Fluids Waste Management. – Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Seventh Edition). – Cambridge // Gulf Professional Publ., 2017. – P. 597–636.
12. Sanzone D.M., Neff J.M., Vinhateiro N. Environmental fates and effects of ocean discharge of drill cuttings and associated drilling fluids from offshore oil and gas operations // IOGP Report 543. – March 2016. – P. 4–10.
13. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Исследование остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках // Бурение и нефть. – 2017. – № 5. – С. 42–45.

14. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Керамический пропант или песок? // Сфера. Нефть и газ. – 2018. – № 1. – С. 92–95.
15. BP p.l.c Statistical Review of World Energy 2019. 68th ed. – UK: Pureprint Group Limited, 2019. – 61 p.
16. Hudgins C.M. Jr. Chemical use in North Sea oil and gas E&P // Journal of Petroleum Technology. – January 1994. – V. 46 (01). – P. 67–74.
17. Differential-sticking mechanisms and a simple wellsite test for monitoring and optimizing drilling mud properties / P.I. Reid, G.H. Meeten, P. Clark, B.D. Chambers, A. Gilmour, M.W. Sanders // SPE Drilling & Completion. – June 2000. – V. 15. – № 15 (2). – P. 97–104. DOI: 10.2118/64114-PA
18. Hasan A.R., Kabir C.S. Two-phase flow in vertical and inclined annuli // International Journal of Multiphase Flow. – March 1992. – V. 18 (2). – P. 279–293.
19. Cobb M., Irvine M., Fichera M. Gas development, drill cuttings disposal – best practicable environmental option. – Edinburgh: ERM Worldwide Group Ltd, 2019. – 38 p.
20. Rapold K. Drilling vibration measurement detect bit stick-slip // Oil and Gas Journal. – 1993. – № 9. – P. 66–70.

Поступила 23.12.2020 г.

#### Information about the authors

**Третьяк А.А.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры нефтегазовой техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

**Яценко Е.А.**, доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой общей химии и технологии силикатов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

**Онофриенко С.А.**, старший преподаватель кафедры нефтегазовой техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

**Карельская Е.В.**, инженер кафедры нефтегазовой техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

UDC 622.24.622

## IDENTIFICATION OF DRILLING WASTES AND THEIR USE

Alexander A. Tretyak<sup>1</sup>,  
13050465@mail.ru

Elena A. Yatsenko<sup>1</sup>,  
tksiww@yandex.ru

Sergey A. Onofrienko<sup>1</sup>,  
13050465@mail.ru

Ekaterina V. Karelskaya<sup>1</sup>,  
karelskaya\_1992@mail.ru

<sup>1</sup> M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to solve environmental issues arising during the construction of oil and gas wells. Identification of wastes generated during the construction of wells and their use for the needs of the national economy are the urgent tasks now. Mud recycling issues include: mud separation into dewatered solids (drill cuttings) and dispersed media (drilling mud); production of various types of raw materials from drill cuttings: drilling mud reuse. In order to intensify separation of drill cuttings from the solution, it is proposed to use magnetization. A schematic diagram of drilling mud cleaning using a magnetization unit is proposed. It was found that the magnetization of the drilling fluid helps accelerating the fallout of cuttings from the solution. We offer the technology for obtaining proppant from drill cuttings using associated gas for roasting and a mobile complex that functions directly in the field, on the deposits. The article provides a schematic diagram of a mobile unit for processing drill cuttings. The proppant, prepared from drill cuttings, is proposed to be used for hydraulic fracturing in the fields located in this area. The proposed developments for recycling drilling mud will allow solving the problem of waste management directly at the drilling sites, which will give a significant economic effect for drilling companies.

**The aim** of the research is to evaluate the issues of drilling mud recycling; solve the issues of accelerated separation of cuttings from drilling mud using a magnetic field; to develop a mobile unit for processing drill cuttings using associated gas for proppant firing; to apply for an invention and obtain a patent on the developed technology for producing proppant from drilling waste.

**Objects:** sludge obtained during the construction of wells for various purposes.

**Methods.** A technology for accelerated separation of cuttings from drilling mud was proposed, a mobile universal complex was developed for the manufacture of proppant directly in the field.

**Results.** The main ways of recycling drilling mud were determined, a device for magnetizing drilling mud was proposed. A mobile universal complex and associated gas were proposed to use for proppant burning. The developed proppant production technology makes it possible to obtain significant economic and environmental benefits.

**Key words:**

Recycling of drilling mud, magnetization, mobile installation, sludge, proppant.

## REFERENCES

- Guba A.S., Pletneva N.I., Yavich M.Yu. Drilling waste identification. *Oil, gas, innovations*, 2019, no. 11, pp. 82–86. In Rus.
- Matvienko V.V., Kuznetsova V.A., Tsekhansky M.V. About the issue of modern methods of processing and disposal of drilling waste. *Oil and Gas of Siberia*, 2017, no. 3, pp. 147–151. In Rus.
- Tretyak A.A., Rybalchenko Yu.M., Lubyanova S.I., Turuntaev Yu.Yu., Borisov K.A. Drilling fluids for the construction of wells in complex conditions. *Oil industry*, 2016, no. 2, pp. 28–31. In Rus.
- Tretyak A.Ya., Rybalchenko Yu. M. Theoretical research on drilling fluid management in complicated conditions *Izvestiya of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science. Application*, 2006, no. 7, pp. 56–61. In Rus.
- Osipov Yu.B. Behavior of clay suspensions in a magnetic field. *Geology*, 1964, no. 4, pp. 15–19.
- Pogodin V.K., Golger Yu.Ya., Klassen V.I. On some features of the influence of the electromagnetic field on the movement of ions in the flow of solution. *Application of magnetic water treatment in power engineering*. Materials of the All-Union meeting. Novosibirsk, 1967, pp. 20–24.
- Sherstnev N.M., Shandin S.P., Tolokonsky S.I., Cherskaya N.O., Ugoleva A.V. Application of physical fields to control the properties of drilling fluids and grouting materials. *Russian chemical journal*, 1995, V. 39, no. 5, pp. 22–26. In Rus.
- Tretyak A.A., Onofrienko S.A. *Nanostrukturirovanny, vysokoingibirovanny burovoy rastvor* [Nanostructured, highly inhibited drilling mud]. Patent RF, no. 2708849, 2019.
- Tretyak A.Ya., Mnatsakanov V.A., Zaretsky V.S., Shamanov S.A., Frolov P.A., Chikhotkin V.F., Rybalchenko Yu.M. *Vysokoingibirovanny burovoy rastvor* [Highly inhibited drilling mud]. Patent RF, no. 2303047, 2007.
- Chikhotkin V.F., Tretyak A.Ya., Rybalchenko Yu.M., Burda M.L. Drilling fluid and control of its rheological properties when drilling wells in difficult conditions. *Drilling for oil*, 2007, no. 7–8, pp. 58–60. In Rus.
- Caenn R., Darley H.C.H., Gray R.G. Chapter 14 – Drilling and Drilling Fluids Waste Management. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Seventh Edition)*. Cambridge, Gulf Professional Publ., 2017. pp. 597–636.
- Sanzone D.M., Neff J.M., Vinhateiro N. Environmental fates and effects of ocean discharge of drill cuttings and associated drilling fluids from offshore oil and gas operations. *IOP Report 543*, March 2016, pp. 4–10.
- Mozhzhherin A.V., Korzhavin A.Yu. Studies of the residual conductivity of alumino-silicate and magnesian-quartz proppants under cyclic loads. *Drilling and oil*, 2017, no. 5, pp. 42–45. In Rus.
- Mozhzhherin A.V., Korzhavin A.Yu. Ceramic proppant or sand? *Sphere. Oil and gas*, 2018, no. 1, pp. 92–95. In Rus.
- BP p.l.c. Statistical Review of World Energy 2019*. 68<sup>th</sup> ed. UK, Pureprint Group Limited, 2019, 61 p.
- Hudgins C.M. Jr. Chemical use in North Sea oil and gas E&P. *Journal of Petroleum Technology*, January 1994, vol. 46 (01), pp. 67–74.
- Reid P.I., Meeten G.H., Clark P., Chambers B.D., Gilmour A., Sanders M.W. Differential-sticking mechanisms and a simple

- wellsite test for monitoring and optimizing drilling mud properties. *SPE Drilling & Completion*, June 2000, vol. 15, no. 15 (2), pp. 97–104. DOI: 10.2118/64114-PA
18. Hasan A.R., Kabir S. Two-phase flow in vertical and inclined annuli. *International Journal of Multiphase Flow*, March 1992, no. 18 (2), pp. 279–293.
  19. Cobb M., Irvine M., Fichera M. *Gas development, drill cuttings disposal – best practicable environmental option*. Edinburgh, ERM Worldwide Group Ltd., 2019, 38 p.
  20. Rapold K. Drilling vibration measurement detect bit stick-slip. *Oil and Gas Journal*, 1993, vol. 91, no. 9, pp. 66–70.

*Received: 23 December 2020.*

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

**Alexander A. Tretyak**, Dr. Sc., professor, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

**Elena A. Yatsenko**, Dr. Sc., professor, head of the General chemistry and technology of silicates department, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

**Sergey A. Onofrienko**, senior lecturer, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

**Ekaterina V. Karelskaya**, engineer, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

УДК 662.7:662.763:662.765:621.311.22

## ПАРОВАЯ БЕКИСЛОРОДНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛИГЕНЕРАЦИИ

Шевырёв Сергей Александрович<sup>1</sup>,  
ssa.pmahp@kuzstu.ru

Стрижак Павел Александрович<sup>2</sup>,  
pavelspa@tpu.ru

Ральф-Юве Дитрих<sup>3</sup>,  
ralph-uwe.dietrich@dlr.de

Богомолов Александр Романович<sup>4</sup>,  
barom@kuzstu.ru

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,  
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

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

<sup>3</sup> Институт инженерной термодинамики,  
Германия, 70569, г. Штутгарт, Pfaffenwaldring, 38-40,

<sup>4</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

**Актуальность** исследования связана с перспективами глубокой переработки твердого топлива при нетрадиционном способе получения перегретого водяного пара в условиях тепловых электрических станций при осуществлении паровой бескислородной газификации. Это позволит создать на тепловых электрических станциях высокоэффективные энерготехнологические предприятия с производством не только тепловой и электрической энергии, но и разнообразных химических веществ, в частности водорода и продуктов синтеза Фишера–Тропша.

**Цель:** обобщать возможность и перспективы осуществления процесса паровой бескислородной газификации в условиях получения пара на тепловых электрических станциях в сравнении с широко применяемым процессом парокислородной газификации; сравнить процесс парокислородной и паровой бескислородной газификации по стоимости химических веществ, получаемых из синтез-газа в процессе синтеза Фишера–Тропша.

**Объекты:** процесс паровой бескислородной газификации твердых топлив в условиях полигенерации; способ получения перегретого водяного пара на тепловых электростанциях для осуществления процесса паровой бескислородной газификации.

**Методы:** термодинамический анализ работы тепловых электрических станций с внутрицикловой газификацией; аналитический расчет процесса паровой бескислородной газификации и сравнение с процессом парокислородной газификации; упрощенный расчет стоимости продуктов синтеза Фишера–Тропша при сравнении паровой бескислородной и парокислородной газификации.

**Результаты.** Представлена новая концепция полигенерации с использованием бескислородной паровой газификации в условиях получения пара на тепловых электрических станциях. Новая концепция полигенерации предполагает получение водяного пара с высокой температурой (до 1000 °С) и давлением (до 2–3 МПа) для осуществления паровой бескислородной газификации твердых топлив. Концепция основана на термодинамическом обосновании работы тепловых электрических станций с традиционным паросиловым циклом и перераспределении материальных потоков между паровым котлом и паровой турбиной. Упрощенная экономическая оценка была сделана для расчета цены синтез-газа, получаемого в процессе паровой бескислородной газификации. Показано, что производство синтез-газа путем паровой бескислородной газификации в новой концепции может быть на 15 % дешевле, чем при традиционной парокислородной технологии. Это может быть достигнуто при условии соотношения образующегося газа в процессе паровой бескислородной и парокислородной технологий более чем 3,5:1, соответственно.

### Ключевые слова:

Высокотемпературный водяной пар, бескислородная газификация, возобновляемые ресурсы, полигенерация, синтез Фишера–Тропша.

### Номенклатура

- $T$  – температура, °С;
- $P$  – давление, Па;
- $S$  – энтропия, кДж/(кг·К);
- $K$  – критическая точка для воды;
- $G_{ex}$  – расход питательной воды в паровой котел, кг/с;
- $G_{wv}$  – расход перегретого пара, поступающего из паровой турбины в паровой котел для дополнительного перегрева, кг/с;
- $\Delta H$  – тепловой эффект химической реакции, Дж/кг;
- $c_a$  – теплоемкость золы, кДж/(кг·К);
- $c_c$  – теплоемкость углерода, кДж/(кг·К);
- $c_{av}$  – средняя теплоемкость золы, кДж/(кг·К);
- $c_{cav}$  – средняя теплоемкость углерода, кДж/(кг·К);

- $c$  – теплоемкость углеродной частицы, кДж/(кг·К);
- $i_s$  – удельная энтальпия пара при соответствующем давлении и температуре, кДж/кг;
- $A^d$  – содержание золы углеродной частицы, % мас.;
- $G_{ss}$  – расход перегретого пара для газификации, кг/с;
- $Q_{ss}$  – тепловой поток перегретого пара для газификации, Вт;
- $G_{gm}$  – расход газифицируемого материала в газогенераторе, кг/с;
- $G_{st}$  – расход перегретого пара из паровой турбины для газификации, кг/с;
- $Q_w$  – тепловой поток для нагрева питательной воды, Вт;
- $i_{220}^{15.5}$  – энтальпия питательной воды при температуре 220 °С и давлении 15,5 МПа, кДж/кг;
- $i_{10}^{0.1}$  – энтальпия питательной воды при температуре 10 °С и давлении 0,1 МПа, кДж/кг;
- $Q_{st}$  – тепловой поток, требуемый для перегрева пара, требуемого для газификации, Вт;
- $i_{1000}^2$  – энтальпия перегретого пара при температуре 1000 °С и давлении 2 МПа, кДж/кг;
- $i_{250}^2$  – энтальпия перегретого пара при температуре 250 °С и давлении 2 МПа, кДж/кг;
- $Q_{e.f.}$  – теплотворная способность условного топлива, 29,308 МДж/кг;
- $G_f$  – расход топлива на подогрев питательной воды, кг/с;
- $G_{b.f.}$  – дополнительный расход топлива в паровом котле, кг/с;
- $B_u$  – расход топлива в паровом котле, кг/с;
- $b_u$  – удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии, г/(кВт·ч)
- $N_{el}$  – мощность турбины, МВт;
- $Q_{st.b}$  – тепловая мощность парового котла, МВт;
- $q_{tu}$  – удельный расход тепловой энергии на выработку электрической энергии, МДж/(кВт·ч)
- $\eta_p$  – эффективность транспорта пара от котла к паровой турбине, %;
- $\eta_{st.b}$  – эффективность парового котла, %;
- $\eta_{ps}$  – КПД тепловой электрической станции, %;
- $V_g$  – формирование газа в идеальном процессе газификации, м<sup>3</sup>/кг;
- $Q_{LHV}$  – низшая теплотворная способность газа, МДж/кг;
- FT – синтез Фишера–Тропша;
- TEPET – Techno-Economic Process Evaluation Tool (инструмент технико-экономической оценки).

#### Введение

Технология газификации углеводородного сырья является одним из самых распространенных методов получения синтез-газа во всем мире. Известны исследования по газификации в различных окислительных, нейтральных и восстановительных средах при умеренных и высоких температурах. Достаточно подробно изучено влияние как характеристик исходного материала, так и условий протекания процесса газификации на выход и состав вырабатываемого синтез-газа [1].

Применение синтез-газа, получаемого в процессе газификации, осуществляется по двум направлениям: (i) в качестве топлива для энергетических установок – паровые котлы, газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания [2, 3]; (ii) в качестве исходного сырья для нетопливного применения с использованием различных технологий. Например, производство жидкого синтетического топлива по методу Фишера–Тропша [4].

Перспективным и наиболее востребованным направлением исследований остается получение синтез-газа для нетопливного применения при использовании его для производства жидких углеводородов, различных спиртов, смазочных материалов, различных эфиров и других веществ. Изучению этих процессов посвящено множество работ, направленных на исследование закономерностей и характеристик протекающих процессов для известных способов газификации.

Для нетопливного применения синтез-газ должен содержать как можно больше целевых компонентов в виде CO и H<sub>2</sub>. При этом объемное отношение целевых компонентов также должно составлять определенную величину для получения конкретного про-

дукта. Например, если рассматривать получение жидких углеводородов по методу синтеза Фишера–Тропша соотношение CO:H<sub>2</sub>=1:2 [4].

Получить наибольшее содержание CO и H<sub>2</sub> в синтез-газе можно только в условиях парового бескислородного дутья в сравнении с различными газифицирующими агентами: воздух, кислород, вода и их смеси. Однако при этом имеется существенная проблема получения экономически эффективным способом большого количества водяного пара с высокой температурой (примерно до 1000–1200 °С) и относительно высоким давлением (до 2–3 МПа).

Исследованиями паровой бескислородной газификации посвящено значительное количество работ в литературе. Как правило, процесс непосредственной паровой газификации проводят для частиц, предварительно прошедших термическую обработку [5]. Очень часто используют двухкамерные реакторы с кипящим слоем для экспериментального исследования паровой газификации [6]. Двухстадийность процесса во многих исследованиях позволяет для непосредственной газификации использовать частицы, состоящие из нелетучего углерода и золы. Это позволяет получить не только энергию для протекания процесса газификации (за счет сжигания летучих веществ), а также обеспечить достаточно высокое качество синтез-газа. Протекание процесса газификации в две стадии позволяет снизить расход перегретого пара, однако вместе с этим также значительно снижает образование целевых компонентов синтез-газа – CO и H<sub>2</sub>. При использовании в качестве газифицирующего агента только водяного пара, например, в обеих камерах двухстадийных газогенераторов требуется значительное количество пара.

Большое количество водяного пара для эффективной реализации процесса газификации необходимо из-за существенной эндотермичности химических реакций, протекающих в газогенераторе. Одним из целесообразных вариантов при настоящем уровне развития техники является получение перегретого водяного пара с заданными параметрами в условиях полигенерации [3]. Это можно осуществлять на тепловых электрических станциях, одновременно производящих тепловую и электрическую энергию, а также синтез-газ при паровой бескислородной газификации. Отсутствие кислорода крайне важно, так как это позволяет существенно сократить затраты на процесс газификации, в частности электрической энергии на получение кислорода, и таким образом значительно повысить экономическую привлекательность данного способа.

Существуют паровые котельные агрегаты, которые позволяют получать перегретый водяной пар до критических ( $P < 23$  МПа,  $T < 560$  °С) параметров для привода паровых турбин [7]. В топке таких паровых котлов температура дымовых газов существенно выше 1200 °С, что позволяет осуществлять эффективный теплообмен между дымовыми газами и водяным паром. Благодаря такой высокой температуре также широко используется промежуточный перегрев водяного пара для уменьшения конечной влажности пара в последних ступенях паровой трубы и повышения КПД цикла [8].

Если осуществлять процесс промежуточного перегрева водяного пара не с целью уменьшения конечной влажности, а для повышения температуры при относительно невысоком давлении, то в этом случае можно получать большое количество высокотемпературного водяного пара для осуществления процесса паровой бескислородной газификации. Такая организация работы парового котла и паровой турбины может быть организована без значительного изменения конструкции парового котла и внедрена для большого класса не только крупных, но и средних по мощности энергетических станций. При незначительном давлении перегретого водяного пара, направляемого на паровую газификацию, отсутствует необходимость использования трубопроводы из высококачественных марок сталей, которые применяются при сверхкритических и ultrasверхкритических параметрах водяного пара [9].

В Российской Федерации существует государственный стандарт ГОСТ 5632-2014 [10]. В нем описаны различные материалы и сплавы, которые могут быть применимы для температуры менее 1000 °С и давления менее 30 бар. При этом срок службы данных материалов может варьироваться от 1 года и более в зависимости от температуры пара. Например, если температура пара в дополнительном парогенераторе будет около 850 °С, то его ожидаемый срок службы может составлять около 11 лет. В научной литературе представлены работы по паровой конверсии метана, например [11, 12]. В некоторых из них показаны различные материалы и сплавы, которые применяются в том числе и как катализаторы при температуре до 900 °С и давлении до 15 бар.

Цель настоящей работы – термодинамическое обоснование перспектив производства в условиях полигенерации высокотемпературного водяного пара среднего давления, используемого для осуществления процесса паровой бескислородной газификации, оценка его стоимости и сравнение с известными технологиями.

#### Методология

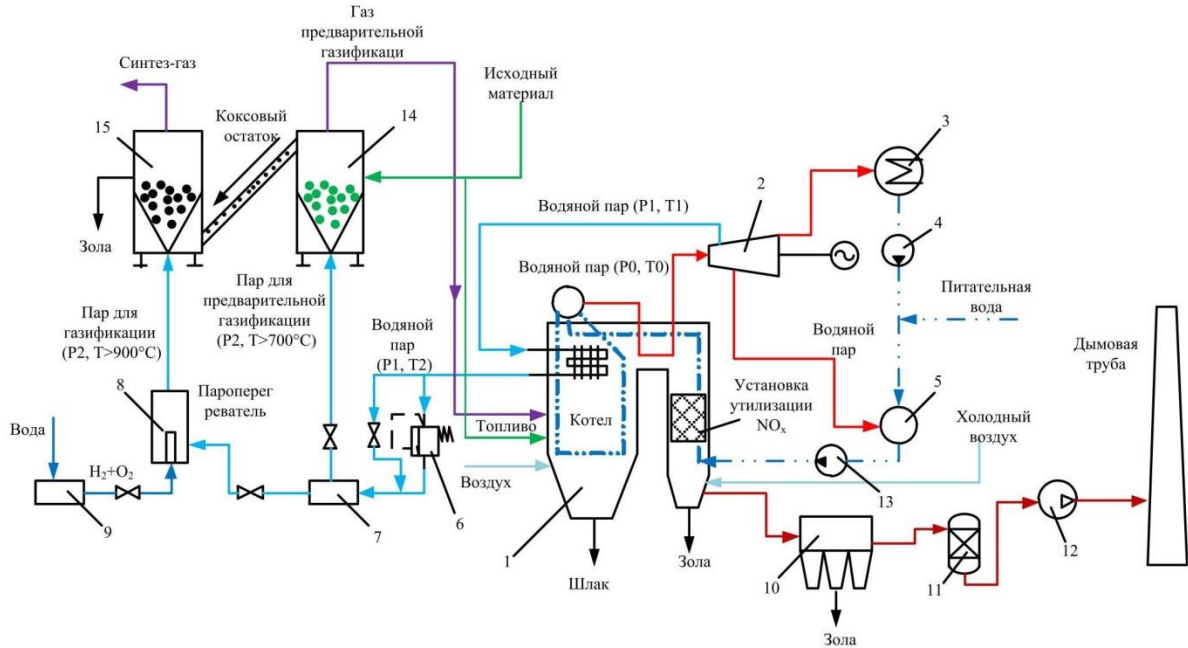
Принципиальная схема производства высокотемпературного водяного пара в условиях полигенерации включает несколько необходимых элементов (рис. 1). Они взаимодействуют друг с другом и позволяют получать тепловую, электрическую энергию и перегретый водяной пар для осуществления паровой бескислородной газификации различного исходного сырья, например биомассы, угля или твердых бытовых отходов.

Центральным элементом схемы является паровой котел – 1. Его основной задачей является получение тепловой энергии в виде перегретого водяного пара с высоким давлением и температурой ( $P_0, T_0$ ) для подачи в паровую турбину – 2. В паровой турбине должен быть предусмотрен регулируемый отбор водяного пара с более низкими параметрами ( $P_1, T_1$ ).

Отработавший пар из турбины (с параметрами  $P_1, T_1$ ) поступает в котел, где он снова перегревается до высокой температуры ( $P_1, T_2$ ) при осуществлении изобарного процесса. Температура перегрева  $T_2$  водяного пара зависит от характеристик котла, условий теплообмена в топке котла. При расположении дополнительного пароперегревателя в радиационной части котла, где температура дымовых газов имеет максимальную температуру, можно ожидать температуру перегрева водяного пара более 900 °С при требуемом давлении не более 2–3 МПа. Эти параметры вторичного перегрева водяного пара могут быть достигнуты при использовании широкой номенклатуры котельных агрегатов, работающих на различных видах топлива.

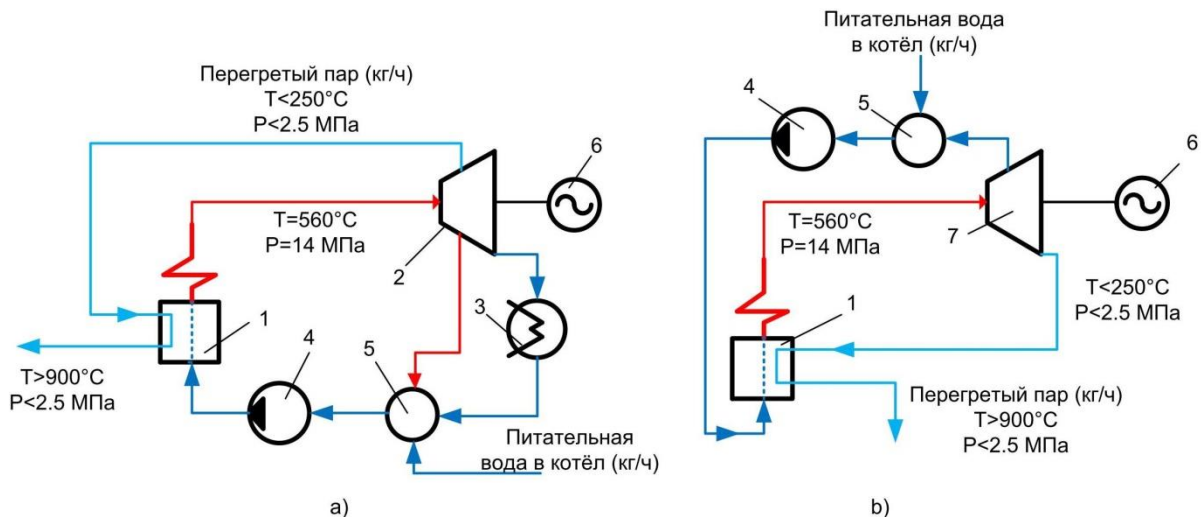
В соответствии с предлагаемой схемой организации процесса получения перегретого водяного пара (рис. 1) паровая бескислородная газификация может быть осуществлена при использовании принципиально разных по назначению турбин (рис. 2). Так, например, при необходимости получения тепловой энергии для снабжения сторонних потребителей может быть применена теплофикационная турбина. При отсутствии потребителей можно применять турбину с противодавлением, на выходе из которой отработавший водяной пар подается сразу в котел. После дополнительного перегрева водяной пар поступает на паровую газификацию.

После перегрева в котле водяной пар поступает в редуциционную установку – 6 (рис. 1), где его давление и температура при необходимости уменьшаются. Далее водяной пар поступает в газификатор и аппарат пиролиза. Последний может быть использован для предварительной газификации исходного материала с целью получения коксового остатка и парогазовой смеси.



**Рис. 1.** Принципиальная схема полигенерации в условиях конденсационной электрической станции: 1 – паровой котел; 2 – паровая турбина с регулируемым отбором пара; 3 – конденсатор; 4 – питательный насос; 5 – регенеративный теплообменник; 6 – редукционная установка; 7 – делитель потоков; 8 – кислородно-водородный пароперегреватель; 9 – электролизная установка; 10 – электрофильтр; 11 – сероочистка; 12 – дымосос; 13 – насос высокого давления; 14 – аппарат пиролиза исходного материала; 15 – газификатор

**Fig. 1.** Schematic diagram of polygeneration in a condensing power station: 1 – steam boiler; 2 – steam turbine with adjustable extraction of steam; 3 – condenser; 4 – feed pump; 5 – regenerative heat exchanger; 6 – reduction unit; 7 – stream divider; 8 – oxygen-hydrogen superheater; 9 – electrolysis unit; 10 – electrostatic precipitator; 11 – desulfurization; 12 – exhauster; 13 – high pressure pump; 14 – apparatus for pyrolysis of the source material; 15 – gasifier



**Рис. 2.** Принципиальные схемы получения перегретого водяного пара: а) при использовании конденсационной турбины; б) при использовании турбины с противодавлением. 1 – паровой котел; 2 – конденсационная или теплофикационная турбина; 3 – конденсатор; 4 – насос; 5 – регенеративный теплообменник; 6 – электрогенератор; 7 – турбина с противодавлением

**Fig. 2.** Principle diagrams of superheated steam generation: а) using a condensing turbine; б) using a back pressure turbine. 1 – steam boiler; 2 – condensation or cogeneration turbine; 3 – condenser; 4 – pump; 5 – regenerative heat exchanger; 6 – electric generator; 7 – back pressure turbine

Применение аппарата пиролиза имеет следующие преимущества. Большинство соединений таких элементов, как N, S, C и других (например, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>), после аппарата пиролиза вместе с паром (паро-

водяная смесь) поступают в паровой котел. Некоторые из них относительно безвредны, а некоторые нет (например, смолы). Вредные соединения окисляются в котле и попадают в систему очистки (различные



фильтры):  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  и другие. Далее в виде дымового газа поступают в дымовую трубу и рассеиваются.

Коксовый остаток при этом используется в газификаторе для осуществления основного процесса газификации, а парогазовая смесь (водяной генераторный газ), полученная при частичной газификации, может, например, подаваться в котел для сжигания. Организация процесса по указанной схеме позволяет получить дополнительное топливо для сжигания в котле, при частичном замещении основного топлива. Карбонизат, который используется для основного процесса газификации, позволяет значительно улучшить гидродинамический режим в газификаторе, а также получить синтез-газ высокого качества. Такая схема организации процесса может быть востребована при газификации, например, низкокачественного угля (отходы угледобычи) или твердых бытовых отходов.

Разделение процесса на предварительный пиролиз и газификацию дает очень чистый синтез-газ с минимальным количеством балластных примесей. Все летучие вещества и другие балластные примеси, например смолы, во время предварительной газификации попадают в топку котла, где полностью выгорают при высокой температуре. Таким образом, одновременно решается два вопроса: повышение качества синтез-газа, что впоследствии влияет на очистку и синтез химических веществ, а также повышение экологичности и эффективности утилизации вредных веществ при горении. Экологичность и эффективность достигается за счет того, что в котельных агрегатах предусмотрены системы очистки дымового газа, которые позволяют, например, нейтрализовать оксиды серы.

В случае, если не удастся получить перегретый водяной пар приемлемых параметров по температуре в котле, в схеме должен быть предусмотрен дополнительный пароперегреватель – 8 (рис. 1). В этом случае перегретый пар после редукционной установки подается непосредственно в пароперегреватель [13].

Пароперегреватель представляет собой камеру, в которой имеется специальная газовая горелка. В горелку поступает стехиометрическая кислородно-водородная смесь [13] и сжигается в потоке водяного пара, поступающего из котла [14]. Продуктами сгорания кислородно-водородной смеси является водяной пар с незначительным (менее 0,5 % об.) количеством неконденсируемых газов. Кислородно-водородная смесь образуется электролизом или другим известным способом, который позволяет с наименьшими затратами получать необходимое количество смеси для осуществления перегрева водяного пара до требуемой температуры. Регулируя балансовые соотношения продуктов горения кислородно-водородной смеси и перегретого водяного пара, поступающего из котла, можно получать на выходе из пароперегревателя температуру пара, изменяющуюся в широком диапазоне.

Кислородно-водородный пароперегреватель может и не использоваться в качестве одного из основных элементов схемы. Однако в качестве резервного элемента он должен быть предусмотрен. Его использование оказывает влияние на параметры (например,

температуру) перегретого водяного пара, поступающего в газогенератор – 15 (рис. 1), и, соответственно, на качественный состав получаемого синтез-газа [1]. Результаты исследований [15] показывают, что при повышении температуры водяного пара более 900 °С практически исключается содержание смолистых соединений в синтез-газе. Поэтому при необходимости значительного повышения температуры перегретого пара использование пароперегревателя допустимо. В этом случае существенное значение имеют плазменные характеристики золы [6] газифицируемого материала, которые совместно с конструкцией газогенератора определяют максимальную температуру в газогенераторе. Когда температура золы очень высока, она плавится (зависит от сырья). Таким образом изменяются физические свойства и химический состав золы, что может нарушать нормальную работу газогенератора.

### Результаты и обсуждение

#### Энергетические характеристики производства перегретого пара

Термодинамический цикл (рис. 2, а) предлагаемого процесса (рис. 1) представлен на  $T$ - $S$  диаграмме (рис. 3). Черная линия изображает идеальный термодинамический цикл Ренкина 1234561, включающий элементы: паровой котел с пароперегревателем – 1 (рис. 1), паровая турбина с конденсатором – 2, 3 (рис. 1), а также питательные насосы – 4, 13 (рис. 1). Дополнительно на диаграмме обозначены точки 1, 7 и 8, которые соответствуют процессу производства перегретого водяного пара (для газификации) в паровом котле. В точке 7 происходит отбор перегретого водяного пара из турбины с параметрами  $P_1$ ,  $T_1$ , который далее поступает в котельный агрегат. При этом количество отобранного пара из турбины компенсируется дополнительной подпиткой воды в точке 1 перед насосом высокого давления – 13 (рис. 1) до повышения давления воды, поступающей в котел. Перегрев отработавшего пара в турбине осуществляется в котле от параметров  $P_1$ ,  $T_1$  до параметров  $P_1$ ,  $T_2$  – точки 7, 8, при осуществлении изобарного процесса. Необходимое количество теплоты при этом подводится за счет сжигания дополнительного количества топлива в котле. Процесс 7, 8 по своей сути аналогичен процессу работы турбины с перегревом пара.

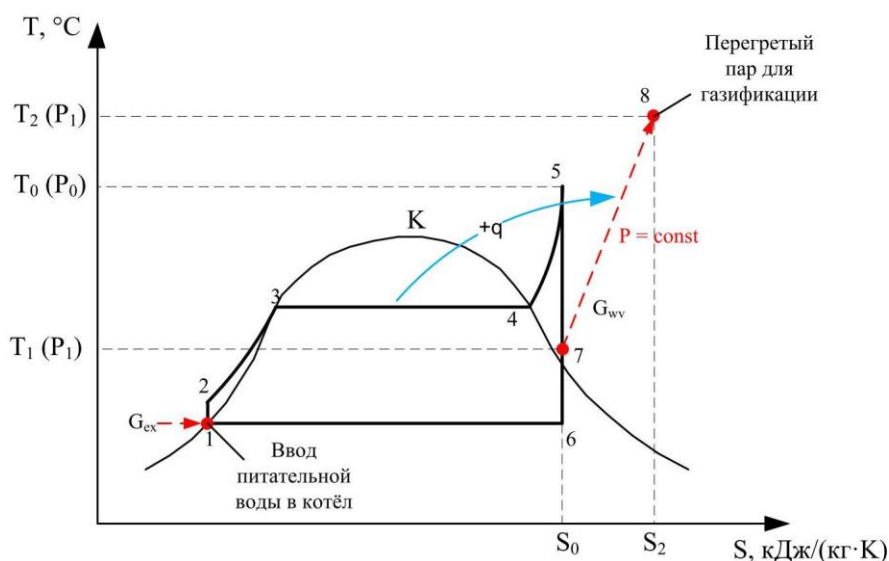
Для проектируемых тепловых электрических станций дополнительный отбор пара из турбины для газификации должен быть заранее предусмотрен в соответствии с тепловой мощностью потока пара вторичного перегрева и проектной мощностью газогенератора.

В соответствии со схемой предлагаемого процесса (рис. 1), перегретым водяным паром может быть осуществлена предварительная газификация исходного материала. В этом процессе происходит частичная газификация исходного материала за счет вноса теплоты с водяным паром.

При частичной паровой газификации тепловые затраты (расход пара) существенно зависят от характеристик исходного материала, степени предваритель-

ной газификации, условий процесса и других параметров. Например, если исходный материал значительно увлажнен, то требуется дополнительное количество пара для его предварительной сушки. С другой

стороны, в случае древесной биомассы или сельскохозяйственной биомассы следует использовать разное количество перегретого водяного пара для получения коксовых частиц.



**Рис. 3.** Условная  $T$ – $S$  диаграмма паросилового цикла с перегревом водяного пара для газификации.  $G_{ex}$ ,  $G_{wv}$  – равные расходы питательной воды и водяного пара соответственно;  $K$  – критическая точка для воды;  $+q$  – подвод тепловой энергии к водяному пару за счет сжигания топлива в паровом котле

**Fig. 3.** Conditional  $T$ – $S$  steam power cycle diagram with steam superheating for gasification.  $G_{ex}$ ,  $G_{wv}$  – feed water and water vapor flow rates, respectively;  $K$  – critical point for water;  $+q$  – thermal energy supply to water vapor due to fuel combustion in the steam boiler

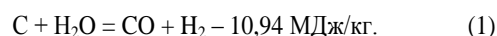
Аналитическая оценка затрат тепловой энергии, поступающей в аппарат пиролиза с перегретым водяным паром, в данном случае крайне затруднительна [16]. Попытка оценки этих параметров приводит к значительному числу допущений и всегда носит приблизительный характер.

Только натурные эксперименты на исходном газифицируемом материале позволяют оценить тепловые затраты на газификацию в этом случае. Среди работ других авторов можно отметить [17], в которой была предпринята оценка тепловых затрат на осуществление процесса пиролиза шламов сточных вод различного происхождения. В данной работе при нагреве с постоянной скоростью влажных образцов было установлено, что некоторые виды отходов могут характеризоваться самоподдерживающимся процессом при сравнении тепловых затрат на пиролиз и теплоты, полученной при сжигании пиролизного газа. Это зависит от количества горючих компонентов, формирующихся в процессе пиролиза, и их теплопроводной способности.

При осуществлении каскадного процесса пиролиза и паровой газификации биомассы или других веществ, как предлагается на рис. 1, в аппарате пиролиза образуется коксовые частицы и парогазовая смесь. Коксовые частицы далее используются в газогенераторе – 15 (рис. 1), а парогазовая смесь может подаваться на сжигание в паровой котел – 1 (рис. 1). В этом случае в работе котла может наблюдаться улучшение характеристик, например, по количеству выбрасываемых вредных веществ в атмосферу ( $SO_x$ ,  $NO_x$ ): (i) за счет

совместного сжигания твердого топлива и газа [7]; (ii) за счет горения и частичной газификации, аналогичной сжиганию водоугольного топлива [18], при поступлении относительно большого количества водяного пара в топку котла.

В процессе паровой газификации коксовых частиц в газогенераторе – 15 (рис. 1) основная химическая реакция может быть представлена следующим образом:



В этом случае можно принять поступление в газификатор частиц, состоящих только из углерода и инертного зольного остатка. В лабораторных условиях при паровой бескислородной газификации для угольных образцов может формироваться до 90 % целевых компонентов ( $CO$  и  $H_2$ ) в составе синтез-газа [19]. Поэтому реакция (1) может быть принята для предварительной оценки существа предлагаемого процесса. В целом реакция (1) отражает протекание процесса паровой бескислородной реакции. И в данном случае далее считается, что частицы (char particles) состоят только из углерода и золы. В этом случае совершенно не важно, какой исходный материал (биомасса) может быть использован для газификации.

Тепловой эффект эндотермической реакции (1) составляет  $\Delta H = 10,94$  МДж/кг [20]. Данный тепловой эффект реакции соответствует параметрам протекания реакции при температуре  $25$  °С и давлении около  $0,1$  МПа. В большинстве случаев газификация

протекает при температурах в газогенераторе 700–1000 °С [21]. При таких температурах тепловой эффект реакции практически не меняется и увеличивается от стандартного теплового эффекта реакции примерно на 3,5 % (за счет изменения теплоемкости веществ, участвующих в реакции) в соответствии с законом Гесса и Кирхгофа. Поэтому в реакции (1) для дальнейших расчетов можно принять тепловой эффект в диапазоне температур 700–1000 °С  $\Delta H=11,3$  МДж/кг.

В реакции (1) участвует только углерод и водяной пар. В реальных условиях при газификации твердых материалов в газифицируемой частице всегда присутствуют минеральные компоненты, доля которых зависит от качества исходного топлива. На нагрев коксовых частиц до необходимой температуры (примем 700 °С) в реакции (1) затрачивается тепловая энергия, поступающая вместе с паром при аллотермической газификации [6]. Теплоемкость таких коксовых частиц изменяется в зависимости от процентного содержания углерода и золы ([22, 23]). Теплоемкость золы и углерода может быть вычислена соответственно:

$$c_a=0,8+0,51\cdot 10^{-3}t-0,13\cdot 10^{-6}t^2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) [22],$$

$$c_c=0,93+0,913\cdot 10^{-3}t-0,41\cdot 10^{-5}t^2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) [23].$$

В диапазоне температур от 700 до 1100 °С теплоемкость углерода и кокса составляет (табл. 1):

**Таблица 1.** Теплоемкость углерода и зольного остатка  
**Table 1.** Specific heat capacity of carbon and ash residue

Удельная теплоемкость Specific heat capacity	Температура Temperature, °С				
	700	800	900	1000	1100
$c_a$ , кДж/(кг·К)/kJ/(kg·K)	1,09	1,12	1,15	1,18	1,20
$c_{ав}$ , средн./average	1,15				
$c_c$ , кДж/(кг·К)/kJ/(kg·K)	1,49	1,60	1,70	1,80	1,90
$c_{св}$ , средн./average	1,7				

Теплоемкость коксовой частицы может быть вычислена по выражению [22]:

$$c = \frac{c_a \cdot m_a + c_c \cdot m_c}{m},$$

где  $m_a$ ,  $m_c$  – массовая доля золы и углерода в частице соответственно;  $m$  – масса частицы.

В диапазоне зольности от 10 до 70 % теплоемкость частицы, при усреднении данных в табл. 1, может быть принята  $c=1,37$  кДж/(кг·К).

В зависимости от типа и мощности паровой турбины расход водяного пара для ее привода может существенно изменяться. Это, в свою очередь, влияет на количество пара, отбираемого на технологические нужды и, в частности, для рассматриваемого примера – на осуществление процесса паровой бескислородной газификации. Рассчитаем удельные энергозатраты на осуществление процесса газификации для 1 кг коксовых частиц.

В результате протекания реакции (1) в соответствии со стехиометрией количество водяного пара, участвующего в реакции, составляет 1,5 кг на 1 кг углерода.

Примем для расчета следующие характеристики водяного пара: температура  $T_1=1000$  °С и давление  $P_2=2$  МПа. При данных параметрах энтальпия пара составляет  $i_s=4637$  кДж/кг.

Суммарные затраты перегретого водяного пара могут быть приняты как сумма теплоты: (i) на нагрев частицы с 700 до 1000 °С; (ii) компенсация теплового эффекта реакции (1); (iii) протекание реакции (1) при взаимодействии углерода кокса и перегретого пара.

Для принятых допущений суммарный расход пара для частиц с зольностью от 10 до 70 % в пересчете на 1 кг реагирующего исходного материала должен составлять величины, представленные в табл. 2. Данные в табл. 2 также учитывают потери теплоты в газогенераторе, которые приняты в размере 3 % от общего теплоступления.

**Таблица 2.** Суммарный расход пара (теплоты) на осуществление паровой газификации коксовых частиц  
**Table 2.** Total steam consumption (heat) for steam gasification of carbon particles

Суммарный расход перегретого пара (теплоты), кг (МДж) Total superheated steam consumption (heat), kg/s (MJ)	$A^d$ , Зольность коксовой частицы, % мас. $A^d$ , char ash content, % wt.						
	10	20	30	40	50	60	70
$G_{ss}$ , кг/с/kg/s	3,74	3,34	2,93	2,52	2,12	1,71	1,31
$Q_{ss}$ , МДж/МДж	17,35	15,47	13,59	11,71	9,82	7,94	6,06

В табл. 2  $G_{ss}$  составляет расход пара на 1 кг газифицируемого материала с различным содержанием минеральных примесей (в соответствии с реакцией (1)).

В схеме на рис. 1 основным элементом является паровой котел. От его характеристик зависит расход перегретого пара на парообразование и характеристики перегретого водяного пара, поступающего на вход в паровую турбину. Причем наиболее важным параметром в данном случае является температура перегретого водяного пара. Для большинства котельных агрегатов, работающих в докритической области, температура перегретого водяного пара может быть принята до 560 °С [24]. При данной температуре и давлении 14 МПа расход перегретого пара на турбину (с параметрами  $P_0$ ,  $T_0$ ) при средней тепловой мощности котельного агрегата 400 МВт составляет около 115 кг/с пара.

В случае совместной работы котла с паровой турбиной с противодавлением (рис. 2, б) значительная часть перегретого водяного пара на выходе из турбины может быть направлена обратно в котельный агрегат. В этом случае необходимо предварительно знать количество перегретого пара, которое поступает из отборов турбины на регенеративный подогрев питательной воды.

В случае использования конденсационной или теплофикационной турбины (рис. 2, а) количество перегретого водяного пара на отбор турбины существенно зависит от вида применяемой турбины. При проектировании турбоагрегатов отбор перегретого

водяного пара на технологические нужды заранее определен техническим заданием, поэтому он может изменяться в широких пределах.

Для оценки расхода перегретого водяного пара, необходимого для осуществления процесса газификации, примем величину отбора в соответствии с усредненными характеристиками паровых турбин. Во многих существующих энергетических установках расход перегретого водяного пара на промышленные нужды составляет до 25–30 % от количества свежего пара на входе в турбину. Следовательно, максимальный отбор перегретого водяного пара из турбины в примере расчета настоящей работы составляет не более  $G_{st}=34,5$  кг/с. При таком расходе и ранее определенном количестве перегретого водяного пара (табл. 2), требуемого для газификации 1 кг исходного топлива, расход газифицируемого материала в газогенераторе составляет (табл. 3):

**Таблица 3.** Расход газифицируемого материала в газогенераторе

**Table 3.** Consumption of gasified material in the gas generator

Расход газифицируемого материала Consumption of gasified material, kg	$A^d$ , Зольность коксовой частицы, % мас. $A^d$ , char ash content, % wt.						
	10	20	30	40	50	60	70
$G_{gms}$ , кг/с/кг/с	9,50	10,65	12,13	14,08	16,77	20,74	27,17

Для современных тепловых электрических станций средний удельный расход топлива относительно выработки электрической энергии в котельном агрегате составляет около  $b_u=280$  г.у.т./кВт·ч ([25, 26]). Данный расход топлива соответствует тепловой электрической станции уже с учетом отборов пара из турбины на регенеративный подогрев питательной воды, но без учета количества перегретого пара, который может быть отобран на паровую газификацию.

При организации процесса дополнительного подогрева водяного пара для осуществления процесса газификации потребуются дополнительное количество тепловой энергии. Это количество тепловой энергии будет получено за счет увеличения количества сжигаемого топлива в топке котла. Таким топливом будет являться либо проектное топливо для соответствующего котельного агрегата, либо горючие летучие вещества, образующиеся при пиролизе газифицируемого сырья (рис. 1). Так как часть перегретого водяного пара отбирается безвозвратно из котельного агрегата, то для восполнения этого количества воды должна увеличиваться подпитка в котел. При этом теплота сжигаемого топлива должна затрачиваться на подогрев воды от температуры, при которой вода поступает при температуре окружающей среды (примем температуру 10 °С), до температуры перегретого водяного пара, то есть до 560 °С. Тогда расход теплоты на подогрев питательной воды, поступающей в котел, составит:

$$Q_w = G_{st} (i_{220}^{15,5} - i_{10}^{0,1}) = 34,5 \cdot (947,66 - 42,11) \cdot 10^3 = 31,2 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Дополнительное количество топлива необходимо затратить на перегрев водяного пара в котельном агрегате. Для ранее принятых параметров это количество теплоты составит:

$$Q_{st} = G (i_{1000}^2 - i_{250}^2) = 34,5 \cdot (4637 - 2903,23) \cdot 10^3 = 59,82 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Нагрев питательной воды может быть осуществлен в отдельно стоящем водогрейном котле при невозможности повышенного отбора пара из турбины на регенеративный подогрев питательной воды. Либо при использовании более мощной паровой турбины (рис. 1) при таком же или меньшем отборе пара из турбины при неизменных характеристиках по электрической мощности.

Дополнительный расход топлива на подогрев питательной воды  $Q_w$  с учетом теплоты сгорания условного топлива составит:

$$G_f = \frac{Q_w}{Q_{e.f}} = \frac{31,2 \cdot 10^6}{29,308 \cdot 10^6} = 1,06 \text{ кг/с.}$$

При этом может быть использовано любое топливо для подогрева питательной воды, а также любые нетрадиционные источники тепловой энергии, например солнечные электростанции [27, 28].

Получение тепловой энергии для перегрева водяного пара  $Q_{st}$  в паровом котле – 1 (рис. 1) может быть осуществлено: (i) за счет увеличения расхода топлива, на которое спроектирован паровой котел; (ii) за счет совместного сжигания проектного топлива и газа, образующегося при частичной газификации исходного материала в аппарате пиролиза – 14 (рис. 1).

С учетом теплоты сгорания условного топлива дополнительный расход его в паровом котле составит:

$$G_{b.f} = \frac{Q_{st}}{Q_{e.f}} = \frac{59,82 \cdot 10^6}{29,308 \cdot 10^6} = 2,04 \text{ кг/с.}$$

При заданном удельном расходе топлива  $b_u=280$  г.у.т./кВт·ч общий КПД электростанции может быть вычислен (для условного топлива с тепловой сгорания 29,308 МДж/кг):

$$\eta_{ps} = \frac{123}{b_u} = \frac{123}{280} = 0,44.$$

Удельный расход теплоты (перегретого пара) на выработку электрической энергии может быть вычислен:

$$q_{tu} = \frac{3600 \cdot \eta_p \cdot \eta_{st,b}}{\eta_{ps}} = 7216,36 \text{ кДж/(кВт·ч)},$$

где  $\eta_p$  – КПД транспорта пара от котла к паровой турбине, % (принято 98 %);  $\eta_{st,b}$  – КПД парового котла, % (принято 90 %).

Электрическая мощность турбины может быть рассчитана следующим образом:

$$N_{el} = \frac{Q_{st,b}}{q_{tu}} = \frac{1,44 \cdot 10^9}{7216,36} = 199,5 \text{ МВт,}$$

где  $Q_{st,b}$  – тепловая нагрузка (мощность) парового котла, MW, принятая 400 МВт, или  $1,44 \cdot 10^9$  кДж/ч.

Действительный расход условного топлива в паровом котле может быть рассчитан следующим образом:

$$B_u = b_u \cdot N_{el} = 15,5 \text{ кг/с.}$$

Зная вышеопределенные дополнительные расходы топлива на подогрев питательной воды  $G_f$  и на дополнительный перегрев водяного пара в котле  $G_{b,f}$ , можно оценить изменение удельного расхода условного топлива на выработку электрической энергии  $b_u$ , которое составит 316,5 г/(кВт·ч) и 335,6 г/(кВт·ч) соответственно:

$$B = B_u + G_{b,f} = 15,5 + 2,04 = 17,54 \text{ кг/с,}$$

$$b_u = \frac{B}{N_{el}} = \frac{17,54 \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{199,5 \cdot 10^6} = 316,5 \text{ г/(кВт}_e \cdot \text{ч).}$$

С учетом теплоты нагрева питательной воды, поступающей в котел:

$$G_{b,f} = \frac{Q_{st} + Q_w}{Q_{e,f}} = \frac{59,82 \cdot 10^6 + 31,2 \cdot 10^6}{29,308 \cdot 10^6} = 3,1 \text{ кг/с,}$$

$$B = B_u + G_{b,f} = 15,5 + 3,1 = 18,6 \text{ кг/с,}$$

$$b_u = \frac{B}{N_{el}} = \frac{18,6 \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{199,5 \cdot 10^6} = 335,6 \text{ г/(кВт}_e \cdot \text{ч).}$$

Полученные результаты на 13 и 19,6 % больше принятого ранее среднего значения  $b_u=280$  г.у.т./кВт·ч [25, 26].

Взросшее количество удельного расхода топлива на выработку электрической энергии необходимо знать для того, чтобы оценить необходимое количество дополнительно сжигаемого топлива в паровом котле. При реализации принципиальной схемы полигенерации, представленной на рис. 1, увеличение расхода топлива позволит оценить минимальное количество (расход) генераторного газа, получаемого при предварительной газификации исходного сырья в аппарате пиролиза и дополнительное количество условного топлива, сжигаемого в котле для получения высокотемпературного водяного пара для газификации.

Экономические индикаторы получения и использования перегретого водяного пара для осуществления процесса Фишера–Тропша

В идеальных условиях при осуществлении процесса газификации состав и количество синтез-газа существенно отличаются в зависимости от характеристик газифицирующего агента (табл. 4).

Для представленных идеальных условий [29]: все реакции (основные и промежуточные) в газогенераторе приводят к образованию следующих компонентов (продуктов) – CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>; реакции протекают полностью. В широко используемых в настоящее время процессах газификации применяется паровоздушное и парокислородное дутье (наиболее распространенный процесс) с внешним подводом тепловой энергии или за счет сгорания части газифицируемого материала. Согласно табл. 4, сравнивая парокислородную газификацию и паровую, стоит отметить, что количество произведенного синтез-газа отличается более чем в 6,5 раз.

**Таблица 4.** Состав синтез-газа в идеальном процессе газификации [29]

**Table 4.** Synthesis gas composition in the ideal gasification process [29]

Газифицирующий агент Gasification process (agent)	Состав газа, % (об.) Gas composition, % (vol.)			V <sub>g</sub> , м <sup>3</sup> /кг m <sup>3</sup> /kg	Q <sub>LHV</sub> , МДж/м <sup>3</sup> MJ/m <sup>3</sup>
	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
Воздух/Air	34,7	–	65,3	5,39	4,4
Вода/Water	50	50	–	17,7	11,77
Воздух+вода Air+water	40,3	18,2	41,5	4,63	7,08
O <sub>2</sub> +вода/O <sub>2</sub> +water	68,9	31,1	–	2,71	12,15

С точки зрения наилучших условий для тепломассообмена между газифицируемой средой и газифицируемым материалом можно выделить кипящий слой и поточный способ газификации. Именно эти условия позволяют получить наибольшее количество синтез-газа с единицы массы газифицируемого топлива. В лабораторных условиях при исследовании различных параметров, влияющих на процесс газификации, образование газа составляет в среднем около 30–40 % от теоретически возможного [30]. Для промышленных поточных газогенераторов при парокислородной газификации угля характерно производство синтез-газа в количестве около 1,8–2 нм<sup>3</sup>/кг газифицируемого топлива [31]. Такой расход синтез-газа составляет около 70 % от теоретически возможного (табл. 4). Для известных опытно-промышленных газогенераторов при парокислородной газификации биомассы выход синтез-газа составляет около 1 нм<sup>3</sup>/кг [32], или примерно 38 % от теоретически возможного выхода газа. Различие между экспериментальными и теоретическими результатами можно объяснить использованием различного сырья для газификации (уголь и биомасса), а также разными условиями тепломассообмена и гидродинамики в активной зоне газогенератора. Не весь исходный материал может реагировать с газифицирующим агентом, поскольку значительная часть подводимого тепла уходит на протекание различных эндотермических реакций.

Так как паровая бескислородная газификация в чистом виде (с отсутствием любых других газообразных веществ в газифицирующем агенте и без внешнего подвода тепловой энергии) в промышленном масштабе не представлена, примем для дальнейших расчетов выход газа в процентном отношении, аналогичный таковому при парокислородной газификации. В этом случае при сохранении относительных выходов газа с 1 кг газифицируемого материала (табл. 4) можно ожидать около 6,73 нм<sup>3</sup>/кг газифицируемого материала.

В ранее проводимых экспериментальных исследованиях [29] было установлено, что в зависимости от условий проведения процесса газификации и характеристик газифицируемого материала возможно получить синтез-газ с соотношением около H<sub>2</sub>:CO=2:1. Именно такое соотношение требуется для производства жидких углеводородов по методу Фишера–Тропша [4]. Поэтому для дальнейшей оценки принято, что синтез-газ может содержать 90 % целевых про-

дуктов в виде  $H_2+CO$  при их соотношении в смеси 2:1 при протекании основной реакции (1).

Сделаем оценку эксплуатационных затрат на производство синтез-газа и синтетического топлива из него при сравнении паровой бескислородной и парокислородной газификации. При оценке эксплуатационных затрат необходимо учитывать следующие параметры: (i) расход и стоимость газифицируемого материала; (ii) количество получаемого синтез-газа; (iii) расход и стоимость перегретого водяного пара; (iv) потребление электричества на выработку кислорода.

Поставленная цель настоящей работы предполагает рассмотрение только процесса производства перегретого водяного пара в условиях полигенерации. Поэтому оценка эксплуатационных затрат будет выполняться с точки зрения газифицирующего агента при сравнении паровой бескислородной газификации и парокислородной. В связи с этим не рассматривается детально процесс ФТ-синтеза и сопутствующие ему эксплуатационные затраты, а также другие затраты, связанные с работой основного оборудования, например затраты электроэнергии на привод насосов и компрессоров.

Эксплуатационные характеристики паровой бескислородной и парокислородной газификации представлены в табл. 5.

В качестве газифицируемого материала для сравнительной оценки принята биомасса в виде древесины. Стоимость воды, электричества, биомассы, кислорода и пара принята на основе данных [33] для Германии (табл. 6). В данном случае выбор страны не имеет значения, так как рассматриваются относительные затраты на два принципиально различных способа газификации по газифицирующему агенту. Расход синтез-газа при осуществлении процесса Фишера–Тропша принят  $7000 \text{ м}^3$  газа на 1 т получаемых продуктов [34].

Таблица 5. Сравнение процессов газификации

Table 5. Comparison of gasification processes

Параметр/Parameter	Единица измерения Unit	Вид процесса Type of gasification	
		$O_2+H_2O$ [32]	$H_2O$
Расход топлива (реакция 1) Fuel consumption (Reaction 1)	кг/kg	1	1
Образование синтез-газа Syngas formation	$\text{м}^3$ (синтез-газа)/кг $\text{м}^3$ (synt.gas)/kg	1,04	6,73
Выход продуктов ФТ-синтеза FT products formation	$\text{м}^3$ (синтез-газа)/кг $\text{м}^3$ (synt.gas)/kg	7	7
Расход $H_2O$ $H_2O$ consumption	$\text{кг}/\text{м}^3$ (синтез-газа) $\text{kg}/\text{м}^3$ (synt.gas)	0,312	1,31–3,74
Электричество (производство $O_2$ ) Electricity ( $O_2$ production)	$\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (синтез-газа) $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{м}^3$ (synt.gas)	0,231	0

Расходные характеристики для парокислородной газификации приняты на основе данных [32]. Затраты на электроэнергию, необходимую для выработки кислорода, приняты на основе усредненных данных для

кислородных станций, применяемых для парокислородной газификации угля.

Таблица 6. Стоимость материалов [33]

Table 6. Costs of materials [33]

Материал/Parameter	Цена/Price	Ед. измерений/Unit
Биомасса (влажная) Biomass (wet)	0,0974	€/кг/€/kg
$H_2O$ (25 бар)/ $H_2O$ (25 bar)	0,026	€/кг/€/kg
Электричество/Electricity	0,105	€/(кВт·ч)/€/kW·h

По данным табл. 4, 5 определена стоимость эксплуатационных расходов при получении 1 кг жидких продуктов в процессе Фишера–Тропша (табл. 7):

- парокислородная газификация:

$$\text{Стоимость} = \text{расход топлива} \cdot \text{цена топлива} + \text{выход синтез-газа} \cdot \text{цена } H_2O + \text{расход } H_2O \cdot \text{цена } H_2O + \text{выход синтез-газа} \cdot \text{цена электричества.}$$

$$\text{Стоимость} = (1 \cdot 0,974 + 1,04 \cdot 0,312 + 0,026 + 1,04 \cdot 0,231 \cdot 0,105) \times 1000 = 131 \text{ € за } 1000 \text{ м}^3 \text{ синтез-газа.}$$

- паровая бескислородная газификация:

$$\text{Стоимость} = \text{расход топлива} \cdot \text{цена топлива} + \text{расход пара} \cdot \text{цена пара.}$$

$$\text{Расход топлива} \cdot \text{цена топлива} = 1 \cdot 0,0974 = 0,0974 \text{ €.}$$

$$\text{Расход пара} \cdot \text{цена пара:}$$

- $A^d=70\%$ :  $1,31 \cdot 0,026 / (6,73 \cdot (1-0,7)) = 0,016869 \text{ €.}$

- $A^d=10\%$ :  $3,74 \cdot 0,026 / (6,73 \cdot (1-0,1)) = 0,016054 \text{ €.}$

После суммирования:

- $A^d=70\%$  – Стоимость =  $0,0974 + 0,016869 = 0,114269$ , или 114,269 € за  $1000 \text{ м}^3$ .

- $A^d=10\%$  – Стоимость =  $0,0974 + 0,016054 = 0,113454$ , или 113,454 € за  $1000 \text{ м}^3$ .

Среднее значение между  $A^d=70\%$  и  $A^d=10\%$ , соответственно:

$$(114,269 + 113,454) / 2 = 113,7 \text{ € за } 1000 \text{ м}^3 \text{ синтез-газа.}$$

Стоимость жидких продуктов синтеза Фишера–Тропша:

- парокислородная газификация:

$$\text{Стоимость} = 131 \cdot 7 = 917 \text{ € за } 1000 \text{ кг.}$$

- паровая бескислородная газификация:

$$\text{Стоимость} = 113,7 \cdot 7 = 795,9 \text{ € за } 1000 \text{ кг.}$$

Таблица 7. Стоимость жидких продуктов в процессе Фишера–Тропша

Table 7. Cost of liquid products in the Fischer–Tropsch process

Категория затрат Cost category	Вид процесса газификации Type of gasification process	
	$O_2+H_2O$	$H_2O$
Стоимость синтез-газа, €/1000 $\text{м}^3$ Cost of synthesis gas, €/km <sup>3</sup>	131	113,7
Стоимость жидких продуктов ФТ-синтеза, €/т Cost of FT-synthesis liquid products, €/t	993,3	795,9

Полученные результаты (табл. 7) показывают, что при укрупненной оценке (для идеальных условий) бескислородная паровая газификация оказывается

намного выгоднее парокислородной технологии. Это связано с тем, что:

- количество синтез-газа при паровой газификации значительно выше, чем при парокислородной (табл. 4, 5);
- при паровой газификации не используется кислород. Таким образом, нет дополнительных установок для производства кислорода, а также затрат электрической энергии.

В табл. 5 относительный выход синтез-газа при сравнении двух технологий газификации принят на основании данных идеального процесса газификации (табл. 4). В действительности относительный расход синтез-газа при сравнении двух процессов окажется значительно ниже. В соответствии с ранее приведенной методикой можно оценить, при каком соотношении выхода газа использование паровой бескислородной технологии газификации становится по затратам сопоставимо с парокислородной (табл. 8).

**Таблица 8.** Стоимость синтез-газа при различном относительном выходе газа

**Table 8.** Cost of synthesis gas at different relative gases components

Относительный выход газа Relative gases components	Стоимость синтез-газа, €/( $10^3 \cdot \text{м}^3$ ) при соответствующей технологии Cost of synthesis gas, €/( $10^3 \cdot \text{м}^3$ ) with appropriate technology	
	O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
6,73:1	131	113,7
5,5:1	131	117,4
4,5:1	131	121,8
3,5:1	131	128,8
2,5:1	131	141,4
1,5:1	131	170,7

По данным табл. 8 видно, что при соотношении теоретического количества образующегося синтез-газа около 3,5:1 при паровой бескислородной и парокислородной газификации стоимость синтез-газа становится сопоставима.

Расходные характеристики синтез-газа с единицы топлива при любой технологии газификации зависят от степени совершенства конструкции газогенератора. Принятое ранее количество газа, образующееся с единицы массы топлива в процессе парокислородной газификации, может быть увеличено за счет совершенства конструкции газогенератора. При этом стоимость синтез-газа будет снижена за счет большего количества синтез-газа, образующего с единицы массы топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gasification of biowaste: a critical review and outlooks / J. Watson, Y. Zhang, B. Si, W-T. Chen, R. de Souza // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 83. – P. 1–17.
2. Hoya R., Fushimi C. Thermal efficiency of advanced integrated coal gasification combined cycle power generation systems with low-temperature gasifier, gas cleaning and CO<sub>2</sub> capturing units // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – V. 164. – P. 80–91.
3. Techno-economic analysis of a trigeneration system based on biomass gasification / R. Segurado, S. Pereira, D. Correia, M. Costa // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – V. 103. – P. 501–514.
4. Ail S., Dasappa S. Biomass to liquid transportation fuel via Fischer Tropsch synthesis – Technology review and current

Результаты оценки стоимости синтез-газа получены только с учетом эксплуатационных затрат на выработку синтез-газа. При более детальной оценке стоимости синтез-газа необходимо учитывать также затраты на капитальное строительство, оплату труда рабочего персонала и необходимых налогов и отчислений. Технологическое обоснование производства перегретого водяного пара в условиях полигенерации показывает, что при паровой бескислородной технологии отсутствует необходимость в отдельном производстве кислорода, а вместе с этим и в затратах на капитальное строительство и приобретение разнообразных дорогостоящих машин и механизмов.

Детальная оценка затрат на выработку синтез-газа при паровой бескислородной газификации в условиях полигенерации с применением метода ТЕРЕТ [30] будет сделана в отдельной работе.

#### Выводы

1. Разработана новая концепция полигенерации для производства электрической и тепловой энергии, а также водяного пара с температурой до 1000 °С и давлением до 2–3 МПа. Водяной пар с такими параметрами позволяет получать синтез-газ высокого качества с самым высоким содержанием СО+Н<sub>2</sub> среди различных технологий газификации.
2. Оценки эксплуатационных расходов производства синтез-газа, полученные по предлагаемой технологии, показывают, что бескислородная паровая газификация может успешно конкурировать с парокислородной технологией при условии получения относительно дешевого водяного пара в условиях полигенерации на тепловых электрических станциях.
3. Сравнение эксплуатационных затрат бескислородной паровой технологии получения синтез-газа и парокислородной технологии позволяет утверждать, что бескислородная паровая технология становится более рентабельной при соотношении объемов образующегося газа более 3,5:1.
4. Стоимость синтез-газа при паровой бескислородной газификации может быть примерно на 15 % дешевле по сравнению с парокислородной технологией при укрупненной оценке эксплуатационных затрат.

*Исследования выполнены за счет средств гранта Российской государственной академии наук (проект № 20-79-00012).*

scenario // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 58. – P. 267–286.

5. Udomsirichakorn J., Salam P. Review of hydrogen-enriched gas production from steam gasification of biomass: the prospect of CaO-based chemical looping gasification // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 30. – P. 565–579.
6. Karl J., Pröll T. Steam gasification of biomass in dual fluidized bed gasifiers: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 98. – P. 64–78.
7. Kalisz S., Pronobis M., Baxter D. Co-firing of biomass waste-derived syngas in coal power boiler // *Energy*. – 2008. – V. 33. – P. 1770–1778.
8. Thermodynamic and economic analysis of a partially-underground tower-type boiler design for advanced double reheat power plants /

- G. Xu, C. Xu, Y. Yang, Y. Fang, L. Zhou, Z. Yang // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – V. 78. – P. 565–575.
9. Пылеугольные энергоблоки на супер- и ультрасверхкритические параметры пара (обзор) / А.Г. Тумановский, А.Л. Шварц, Е.В. Сомова, Э.Х. Вербовецкий, Г.Д. Авруцкий, С.В. Ермакова, Р.Н. Калугин, М.В. Лазарев // *Теплоэнергетика*. – 2017. – № 2. – С. 3–19.
10. ГОСТ 5632-2014 Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – М.: Стандартинформ, 2015. – 54 с.
11. Methane steam reforming operation and thermal stability of new porous metal supported tubular palladium composite membranes / B. Dittmar, A. Behrens, N. Schödel, M. Rüttinger, Th. Franco, G. Straczewski, R. Dittmeyer // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – V. 38. – P. 8759–8771.
12. Pashchenko D. First law energy analysis of thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming // *Energy*. – 2018. – V. 143. – P. 478–487.
13. Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification / N. Nipattummakul, I.I. Ahmed, S. Kerdsuwan, A.K. Gupta // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2010. – V. 35. – P. 11738–11745.
14. Экспериментальное исследование процесса горения смесей водород–кислород и метан–кислород в среде слабонагретого водяного пара / Н.А. Прибатурин, В.А. Федоров, М.В. Алексеев, А.Р. Богомолов, А.Л. Сорокин, С.С. Азиханов, С.А. Шевырёв // *Теплоэнергетика*. 2016. – № 5. – С. 31–36.
15. Makwana J.P., Pandey J., Mishra G. Improving the properties of producer gas using high temperature gasification of rice husk in a pilot scale fluidized bed gasifier (FBG) // *Renewable Energy*. – 2019. – V. 130. – P. 943–951.
16. Advances in mathematical modeling of fluidized bed gasification / C. Loha, S. Gu, J. De Wilde, P. Mahanta, P.K. Chatterjee // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 40. – P. 688–715.
17. Hossain M.K., Strezov V., Nelson P.F. Thermal characterization of the products of wastewater sludge pyrolysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2009. – V. 85. – P. 442–446.
18. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощности / С.В. Алексеев, Л.И. Мальцев, А.Р. Богомолов, М.Ю. Чернецкий, И.В. Кравченко, А.И. Кравченко, Д.А. Лапин, С.А. Шевырёв, С.Ю. Лыршиков // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 16–28.
19. Богомолов А.Р., Шевырёв С.А., Алексеев М.В. Перспективы высокотемпературной газификации угля и шлама // *Теплоэнергетика*. – 2013. – № 2. – С. 77–80.
20. Watanabe H., Otaka M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier // *Fuel*. – 2006. – V. 85. – P. 1935–1943.
21. Progress in biofuel production from gasification / V.S. Sikarwar, M. Zhao, P.S. Fennell, N. Shah, E.J. Anthony // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2017. – V. 61. – P. 189–248.
22. Shilyaev M.I., Afanas'ev Y.O., Bogomolov A.R. Calculating the solid fuel combustion process in a cyclone reactor // *Thermal Engineering*. – 2011. – V. 58. – P. 981–987.
23. One-dimensional model of heat-recovery, non-recovery coke ovens. P. II: Coking-bed sub-model / R. Buczynski, R. Weber, R. Kim, P. Schwöppe // *Fuel*. – 2016. – V. 181. – P. 1115–1131.
24. Behbahanimia A., Ramezani S., Lotfi Hejrandoost M. A loss method for exergy auditing of steam boilers // *Energy*. – 2017. – V. 140. – P. 253–260.
25. Numerical investigation of oxy-fuel combustion in 700 °C-ultra-supercritical boiler / X. Ge, J. Dong, H. Fan, Z. Zhang, X. Shang, X. Hu, J. Zhang // *Fuel*. – 2017. – V. 207. – P. 602–614.
26. Тумановский А.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // *Теплоэнергетика*. – 2017. – № 6. – С. 3–13.
27. Impact of power station capacities and sizes of solar field on the performance of solar aided power generation / C. Huang, H. Hou, E. Hu, M. Liang, Y. Yang // *Energy*. – 2017. – V. 139. – P. 667–679.
28. Behar O. Solar thermal power plants – a review of configurations and performance comparison // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 92. – P. 608–627.
29. Shevryev S., Bogomolov A., Alekssev M. Prospects for production of synthetic liquid fuel from low-grade coal // *EPJ Web of Conferences*. – 2015. – V. 82. – P. 01033.
30. Syngas production by chemical looping gasification of biomass with steam and CaO additive / Y. Wu, Y. Liao, G. Liu, X. Ma // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 43. – P. 19375–19383.
31. Qin S., Chang S., Yao Q. Modeling, thermodynamic and techno-economic analysis of coal-to-liquids process with different entrained flow coal gasifiers // *Applied Energy*. – 2018. – V. 229. – P. 413–432.
32. Steam/oxygen biomass gasification at pilot scale in an internally circulating bubbling fluidized bed reactor / D. Barisano, G. Canneto, F. Nanna, E. Alvino, G. Pinto, A. Villone, M. Carnevale, V. Valerio, A. Battafarano, G. Braccio // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 141. – P. 74–81.
33. A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – a case study / F.G. Albrecht, D.H. König, N. Baucks, R.-U. Dietrich // *Fuel*. – 2017. – V. 194. – P. 511–526.
34. Mrakin A.N., Akimova G.A. Complex analysis of the efficiency of plants for the thermochemical conversion of solid fuel // *Solid Fuel Chemistry*. – 2015. – V. 49. – P. 261–265.

Поступила 09.12.2020 г.

#### Информация об авторах

**Шевырёв С.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики Института энергетики Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

**Стрижак П.А.**, доктор физико-математических наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ральф-Юве Дитрих**, профессор, Немецкий космический центр, Институт инженерной термодинамики.

**Богомолов А.Р.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем тепломассопереноса Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.



UDC 662.7:662.763:662.765:621.311.22

## OXYGEN-FREE STEAM GASIFICATION UNDER POLYGENERATION

**Sergey A. Shevyrev<sup>1</sup>,**  
ssa.pmahp@kuzstu.ru

**Pavel A. Strizhak<sup>2</sup>,**  
pavelspa@tpu.ru

**Ralph-Uwe Dietrich<sup>3</sup>,**  
ralph-uwe.dietrich@dlr.de

**Aleksandr R. Bogomolov<sup>4</sup>,**  
barom@kuzstu.ru

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  
28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russia.

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

<sup>3</sup> German Aerospace Center, Institute of Engineering Thermodynamics, Energy System Integration,  
38-40, Pfaffenwaldring, Stuttgart, 70569, Germany.

<sup>4</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,  
1, Ac. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is associated with the prospects for solid fuel deep processing with an unconventional method of producing superheated water vapor at thermal power plants with oxygen-free steam gasification. This will make it possible to create highly efficient energy technology enterprises at thermal power plants with the production of not only thermal and electrical energy, but also a variety of chemicals, in particular hydrogen and Fischer–Tropsch synthesis products.

**The main aim** of the research is to substantiate the possibility and prospects of the implementation of steam oxygen-free gasification at thermal power plants in comparison with the widely used process of steam-oxygen gasification; to compare the steam-oxygen and steam oxygen-free gasification in terms of the cost of chemicals obtained from synthesis gas in the Fischer–Tropsch process.

**Objects:** oxygen-free steam gasification of solid fuels under polygeneration conditions; method of producing superheated water vapor at thermal power plants for oxygen-free steam gasification.

**Methods:** thermodynamic analysis of the operation of thermal power plants with integrated gasification process; analytical calculation of the oxygen-free steam gasification and its comparison with the steam-oxygen gasification; simplified calculation of the cost of Fischer–Tropsch synthesis products in comparison with steam oxygen-free gasification and steam-oxygen gasification.

**Results.** This paper presents a new concept of polygeneration using oxygen-free steam gasification under conditions of steam production at thermal power plants. The new polygeneration concept assumes the production of water vapor with high temperature (up to 1000 °C) and pressure (up to 2–3 MPa) with a high flow rate for the implementation of oxygen-free steam gasification of solid fuels. The concept is based on the thermodynamic justification of the operation of thermal power plants with a traditional steam-power cycle and the redistribution of material flows between a steam boiler and a steam turbine. A simplified economic assessment was made to calculate the price of syngas produced by steam oxygen-free gasification. It is shown that the production of synthesis gas by oxygen-free steam gasification in the new concept can be 15 % cheaper than with the traditional steam-oxygen technology. This can be achieved if the ratio of the generated gas in steam oxygen-free gasification and steam-oxygen technologies is more than 3,5:1 respectively.

**Key words:**

High temperature water vapor, oxygen-free gasification, renewable resources, polygeneration, Fischer–Tropsch synthesis.

*This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 20-79-00012).*

**Nomenclature**

- $T$  – temperature, °C;
- $P$  – pressure, Pa;
- $S$  – entropy, kJ/(kg·K);
- $K$  – critical point for water;
- $G_{ex}$  – feed water flow to the steam boiler, kg/s;
- $G_{wv}$  – consumption of superheated steam coming from the steam turbine to the boiler for additional superheating, kg/s;
- $\Delta H$  – thermal effect of a chemical reaction, J/kg;
- $c_a$  – ash heat capacity, kJ/(kg·K);
- $c_c$  – carbon heat capacity, kJ/(kg·K);
- $c_{aav}$  – average ash heat capacity, kJ/(kg·K);
- $c_{cav}$  – average carbon heat capacity, kJ/(kg·K);
- $c$  – char heat capacity, kJ/(kg·K);
- $i_s$  – specific enthalpy of superheated steam at appropriate pressure and temperature, kJ/kg;
- $A^d$  – char ash content, % wt;
- $G_{ss}$  – superheated water vapor consumption for gasification, kg/s;

- $Q_{ss}$  – heat flux of superheated steam fed to gasification, W;
- $G_{gm}$  – consumption of gasified material in the gas generator, kg/s;
- $G_{st}$  – consumption of superheated steam from the steam turbine for gasification, kg/s;
- $Q_w$  – heat flux to feed water heating, W;
- $i_{220}^{15.5}$  – feed water enthalpy at a temperature of 220 °C and a pressure of 15,5 MPa, kJ/kg;
- $i_{10}^{0.1}$  – feed water enthalpy at 10 °C and pressure 0,1 MPa, kJ/kg;
- $Q_{st}$  – heat flux required for superheating of steam supplied for gasification, W;
- $i_{1000}^2$  – enthalpy of superheated steam at a temperature of 1000 °C and a pressure of 2 MPa, kJ/kg;
- $i_{250}^2$  – enthalpy of superheated steam at a temperature of 250 °C and a pressure of 2 MPa, kJ/kg;
- $Q_{e.f.}$  – calorific value of equivalent fuel, 29,308 MJ/kg;
- $G_f$  – fuel consumption for feed water heating, kg/s;
- $G_{b.f.}$  – extra fuel consumption in a steam boiler, kg/s;
- $B_u$  – fuel consumption in the steam boiler, kg/s;
- $b_u$  – specific consumption of reference fuel for the generation of electric energy, g/(kW<sub>e</sub>·h)
- $N_{el}$  – turbine electric power, MW;
- $Q_{st.b}$  – heat load (power) of the steam boiler, MW;
- $q_{tu}$  – specific heat consumption for electricity generation, MJ/(kW·h)
- $\eta_p$  – efficiency of steam transportation from the boiler to the steam turbine, %;
- $\eta_{st.b}$  – steam boiler efficiency, %;
- $\eta_{ps}$  – thermal power plant efficiency, %;
- $V_g$  – gas formation in an ideal gasification process, m<sup>3</sup>/kg;
- $Q_{LHV}$  – net calorific value of gas, MJ/kg;
- FT – Fischer–Tropsch chemical synthesis;
- TEPET – Techno-Economic Process Evaluation Tool.

## REFERENCES

1. Watson J., Zhang Y., Si B., Chen W-T., de Souza R. Gasification of biowaste: a critical review and outlooks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 83, pp. 1–17.
2. Hoya R., Fushimi C. Thermal efficiency of advanced integrated coal gasification combined cycle power generation systems with low-temperature gasifier, gas cleaning and CO<sub>2</sub> capturing units. *Fuel Processing Technology*, 2017, vol. 164, pp. 80–91.
3. Segurado R., Pereira S., Correia D., Costa M. Techno-economic analysis of a trigeneration system based on biomass gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 103, pp. 501–514.
4. Ail S., Dasappa S. Biomass to liquid transportation fuel via Fischer Tropsch synthesis – Technology review and current scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 267–286.
5. Udomsirichakorn J., Salam P.A. Review of hydrogen-enriched gas production from steam gasification of biomass: the prospect of CaO-based chemical looping gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 30, pp. 565–579.
6. Karl J., Pröll T. Steam gasification of biomass in dual fluidized bed gasifiers: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 98, pp. 64–78.
7. Kalisz S., Pronobis M., Baxter D. Co-firing of biomass waste-derived syngas in coal power boiler. *Energy*, 2008, vol. 33, pp. 1770–1778.
8. Xu G., Xu C., Yang Y., Fang Y., Zhou L., Yang Z. Thermodynamic and economic analysis of a partially-underground tower-type boiler design for advanced double reheat power plants. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 78, pp. 565–575.
9. Tumanovskii A.G., Shvarts A.L., Somova E.V., Verbovetskii E.Kh., Avrutskii G.D., Ermakova S.V., Kalugin R.N., Lazarev M.V. Review of the coal-fired, over-supercritical and ultra-supercritical steam power plants. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, pp. 83–96.
10. GOST 5632-2014 *Nerzhavayushchie stali i splavy korrozionnostoykie, zharostoykie i zharoprochnye. Marki* [State Standard 5632-2014. Stainless steels and corrosion resisting, heat-resisting and creep resisting alloys. Grades]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 54 p. GOCT
11. Dittmar B., Behrens A., Schödel N., Rüttinger M., Franco Th., Straczewski G., Dittmeyer R. Methane steam reforming operation and thermal stability of new porous metal supported tubular palladium composite membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, pp. 8759–8771.
12. Pashchenko D. First law energy analysis of thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming. *Energy*, 2018, vol. 143, pp. 478–487.
13. Nipattummakul N., Ahmed II., Kerdsuwan S., Gupta A.K. Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, pp. 11738–11745.
14. Pribaturin N.A., Fedorov V.A., Alekseev M.V., Bogomolov A.R., Sorokin A.L., Azikhanov S.S., Shevyrev S.A. Experimental investigation on combustion of hydrogen–oxygen and methane–oxygen mixtures in the medium of low-superheated steam. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, pp. 336–341.
15. Makwana J.P., Pandey J., Mishra G. Improving the properties of producer gas using high temperature gasification of rice husk in a pilot scale fluidized bed gasifier (FBG). *Renewable Energy*, 2019, vol. 130, pp. 943–951.
16. Loha C., Gu S., De Wilde J., Mahanta P., Chatterjee P.K. Advances in mathematical modeling of fluidized bed gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 40, pp. 688–715.
17. Hossain M.K., Strezov V., Nelson P.F. Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, vol. 85, pp. 442–446.
18. Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Bogomolov A.R., Chernetskiy M.Yu., Kravchenko I.V., Kravchenko A.I., Lapin D.A., Shevyrev S.A., Lyrshchikov S.Yu. Results of pilot-operating combustion of coal-water fuel in a low-capacity hot water boiler. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, pp. 16–28. In Rus.
19. Bogomolov A.R., Shevyrev S.A., Alekseev M.V. Prospects for high-temperature gasification of coal and sludge. *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, pp. 153–156.
20. Watanabe H., Otaka M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier. *Fuel*, 2006, vol. 85, pp. 1935–1943.
21. Sikarwar V.S., Zhao M., Fennell P.S., Shah N., Anthony E.J. Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, vol. 61, pp. 189–248.
22. Shilyaev M.I., Afanas'ev Y.O., Bogomolov A.R. Calculating the solid fuel combustion process in a cyclone reactor. *Thermal Engineering*, 2011, vol. 58, pp. 981–987.
23. Buczynski R., Weber R., Kim R., Schwöppe P. One-dimensional model of heat-recovery, non-recovery coke ovens. P. II: Coking-bed sub-model. *Fuel*, 2016, vol. 181, pp. 1115–1131.
24. Behbahania A., Ramezani S., Lotfi Hejrandoost M. A loss method for exergy auditing of steam boilers. *Energy*, 2017, vol. 140, pp. 253–260.
25. Ge X., Dong J., Fan H., Zhang Z., Shang X., Hu X., Zhang J. Numerical investigation of oxy-fuel combustion in 700 °C-ultra-supercritical boiler. *Fuel*, 2017, vol. 207, pp. 602–614.
26. Tumanovskii A.G. Prospects for the development of coal-steam plants in Russia. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, pp. 399–407.
27. Huang C., Hou H., Hu E., Liang M., Yang Y. Impact of power station capacities and sizes of solar field on the performance of solar aided power generation. *Energy*, 2017, vol. 139, pp. 667–679.

28. Behar O. Solar thermal power plants – a review of configurations and performance comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 92, pp. 608–627.
29. Shevyrev S., Bogomolov A., Alekssev M. Prospects for production of synthetic liquid fuel from low-grade coal. *EPJ Web of Conferences*, 2015, vol. 82, pp. 01033.
30. Wu Y., Liao Y., Liu G., Ma X. Syngas production by chemical looping gasification of biomass with steam and CaO additive. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, pp. 19375–19383.
31. Qin S., Chang S., Yao Q. Modeling, thermodynamic and techno-economic analysis of coal-to-liquids process with different entrained flow coal gasifiers. *Applied Energy*, 2018, vol. 229, pp. 413–432.
32. Barisano D., Canneto G., Nanna F., Alvino E., Pinto G., Villone A., Carnevale M., Valerio V., Battafarano A., Braccio G. Steam/oxygen biomass gasification at pilot scale in an internally circulating bubbling fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 141, pp. 74–81.
33. Albrecht F.G., König D.H., Baucks N., Dietrich R-U. A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – a case study. *Fuel*, 2017, vol. 194, pp. 511–526.
34. Mrakin A.N., Akimova G.A. Complex analysis of the efficiency of plants for the thermochemical conversion of solid fuel. *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, pp. 261–265.

Received: 9 December 2020.

#### Information about the authors

**Sergey A. Shevyrev**, Cand. Sc., associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

**Pavel A. Strizhak**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ralph-Uwe Dietrich**, Dr.-Ing., German Aerospace Center.

**Aleksandr R. Bogomolov**, Dr. Sc., leading researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

УДК 556.314(571/5)

## ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ ПЛАСТОВЫХ ВОД РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Новиков Дмитрий Анатольевич<sup>1,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Пыряев Александр Николаевич<sup>3,2</sup>,  
pyrayev@igm.nsc.ru

Черных Анатолий Витальевич<sup>1</sup>,  
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Дульцев Федор Федорович<sup>1</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Рыжкова Светлана Владимировна<sup>1,2</sup>,  
RizhkovaSV@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

<sup>3</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

**Актуальность** исследования состоит в решении вопросов изотопной геохимии подземных вод нефтегазоносных отложений крупных артезианских бассейнов. Воды нефтегазоносных отложений рассматриваемого региона практически не изучены с точки зрения распределения стабильных изотопов ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C$ ) и изотопных соотношений  $^{87}Rb/^{86}Sr$  и  $^{87}Sr/^{86}Sr$ .

**Цель:** выявление особенностей генезиса подземных вод и взаимодействия в системе «вода – горная порода» с позиций изотопной геохимии.

**Методы.** Анализ комплекса  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C_{DIC}$  вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) проводился в центре коллективного пользования Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253. Изотопные соотношения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  и  $^{87}Rb/^{86}Sr$  изучались на масс-спектрометре MI 1201T в двухленточном режиме с регистрацией на одном коллекторе.

**Результаты.** Изучены  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C_{DIC}$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr$  и отношения изотопов и  $^{87}Rb/^{86}Sr$  для вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области. Показано наличие в гидрогеологическом разрезе двух основных генетических типов подземных вод: древних инфильтрационных и седиментогенных. Для большинства изученных вод пара  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  указывает на сочетание двух определяющих факторов: исходное обеднение вод легким изотопом  $^{16}O$  в период «до захоронения» на величину до 4–5 ‰ в результате климатического воздействия; дальнейшее насыщение вод тяжелым изотопом  $^{18}O$  в ходе длительного WRI, приведшее к утяжелению изотопного состава при умеренных условиях на дополнительные 2–3 ‰. Значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  ряда вод позволили предположить бактериальное происхождение водорастворенной углекислоты. Для вод, температура которых превышает 90 °С, наблюдается явный положительный сдвиг изотопного соотношения  $\delta^{13}C_{DIC}$  до величин, отвечающих «нормальным» значениям углеродных дельт в термальных водах: от –8 до +4 ‰ VPDB. Для исследованных подземных вод характерно низкое значение отношения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  относительно вод современного океана. Предполагается значительный вклад мантийных источников стронция, проявляющегося в разной степени для вод различных месторождений.

### Ключевые слова:

Подземные воды,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ,  $\delta^{13}C$ , изотопные соотношения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  и  $^{87}Rb/^{86}Sr$ , взаимодействие в системе «вода – горная порода», разрабатываемые залежи, нефтяное месторождение, Новосибирская область, Западная Сибирь.

### Введение

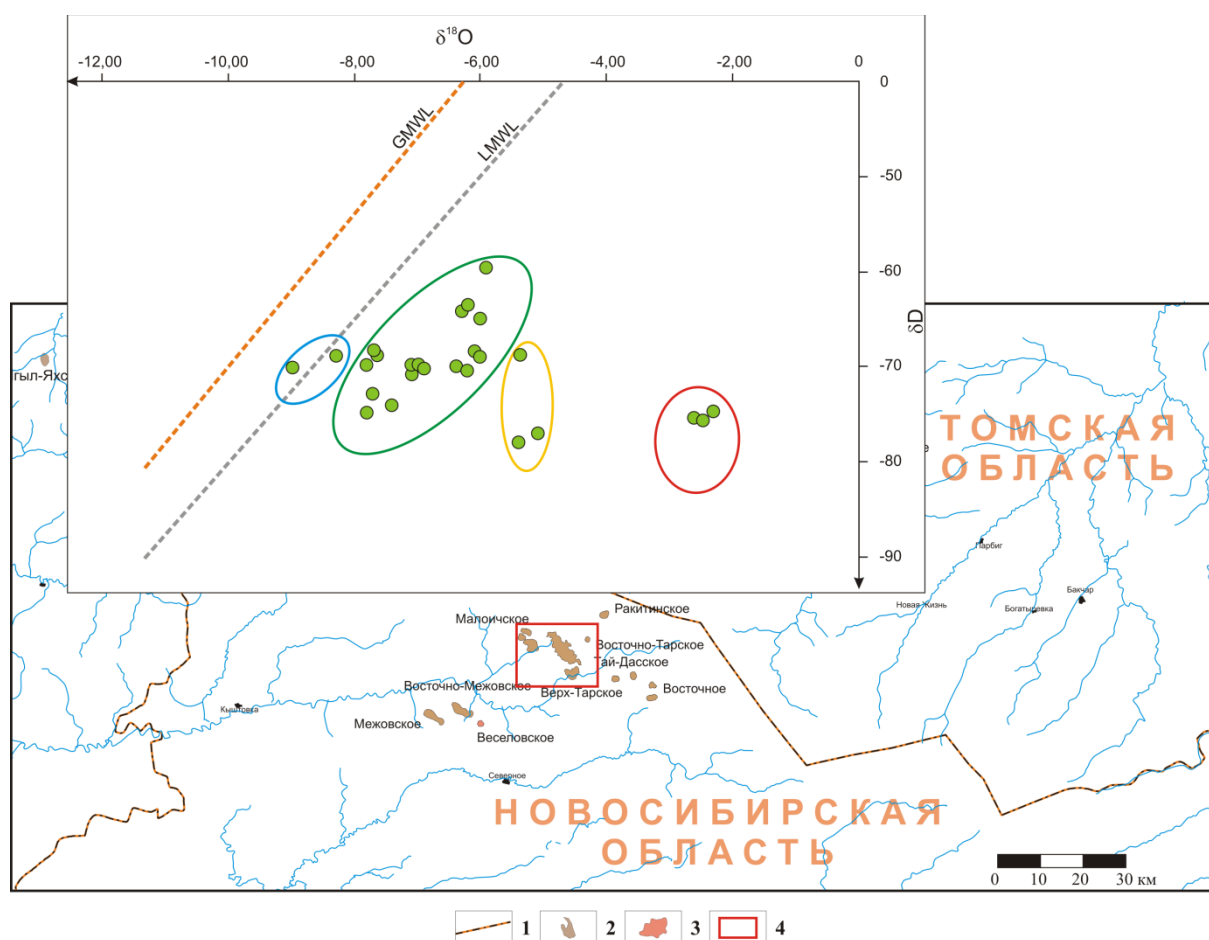
В работе представлены первые данные по концентрациям  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ,  $\delta^{13}C$  и изотопным соотношениям  $^{87}Rb/^{86}Sr$  и  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в водах разрабатываемых залежей нефтяных месторождений Новосибирской области. Вопросы генезиса подземных вод нефтегазоносных бассейнов в науке в настоящее время активно обсуждаются. Комплексный анализ  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ,  $\delta^{13}C$  широко применяется в исследованиях генезиса, динамики подземных вод и процессов их взаимодействия с вмещающими горными породами [1].

В настоящее время на территории Новосибирской области в разработке находятся три нефтяных месторождения: Верх-Тарское, Восточно-Тарское и Малоичское (рис. 1). На Верх-Тарском и Восточно-Тарском месторождениях эксплуатируются залежи горизонта Ю<sub>1</sub> верхнеюрского возраста, а на Малоичском – внутрипалеозойская залежь. Также на Верх-Тарском промысле в разработке находится залежь горизонта НГТЗК (по Е.Е. Даненбергу и А.Э. Конторовичу зона контакта отложений палеозоя и мезозоя или разновозрастный нефтегазоносный горизонт зоны контакта [2, 3]).

Горизонт Ю<sub>1</sub> оксфордского регионального резервуара является основным продуктивным пластом и объектом разработки в исследуемом районе. Залежи разрабатываемых месторождений к настоящему времени практически полностью разбурены сеткой эксплуатационных скважин. Так, общий фонд скважин залежи пластов Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> и Ю<sub>1</sub><sup>2</sup> Верх-Тарского нефтяного месторождения по состоянию на январь 2019 г. составляет 175 единиц, из них 134 действующих [4]. По состоянию на 01.01.2018 г. ее запасы нефти составляют: по категориям А+В<sub>1</sub> (геологические/извлекаемые) – 39,980/10,898 млн т, по категории В<sub>2</sub> – 1,180/0,489 млн т [5]. Последние результаты детальных геотермических, гидродинамических и гидрогеохимических исследований нефтегазовых отложений изучаемого региона отражены в работах [6–10].

#### Фактический материал и методика исследований

В 2019 г. в ходе экспедиционных работ на Малоичском, Восточно-Тарском и Верх-Тарском нефтяных месторождениях было отобрано 18 проб из разных водоносных горизонтов. Дополнительно в сравнительный анализ было привлечено 9 проб подземных вод из неокомских (Северо-Кеумское, Среднекеумское, Юганское месторождения) и ниже-среднеюрских (Западно-Герасимовское месторождение) резервуаров. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП) проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ (аналитики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. Ракул).



**Рис. 1.** Зависимость  $\delta D=f(\delta^{18}O)$  для подземных вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области относительно GMWL и LMWL. 1 – административные границы; месторождения: 2 – нефтяные, 3 – газоконденсатные и газовые; 4 – район исследований. Пояснения к дополнительным обозначениям (эллипсам) – в тексте. Линии: оранжевая – GMWL, серая – LMWL

**Fig. 1.** Dependence  $\delta D=f(\delta^{18}O)$  for groundwater of the developed oil fields of the Novosibirsk region relative to GMWL and LMWL. 1 – administrative boundaries; fields: 2 – oil, 3 – gas condensate and gas; 4 – research area. Explanations for additional symbols (ellipses) see in the text. Lines: orange – GMWL, gray – LMWL

Анализ комплекса  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C_{DIC}$  вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) проводился в центре коллективного пользования Института геологии и минералогии им.

В.С. Соболева СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan<sup>TM</sup> MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для анализа  $\delta D$ ) и GasBench II (для анализа  $\delta^{18}O$  и  $\delta^{13}C_{DIC}$ ).

Значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ,  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  измерялись относительно мировых стандартов: VSMOW2; SLAP2; GISP – для анализа водорода и кислорода; NBS-18; NBS-19 – для анализа  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ . Ошибка определения изотопного состава стандартов по углероду и кислороду – не более 0,1 ‰, по водороду – не более 0,5 ‰. Изотопные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  изучались на масс-спектрометре MI 1201T в двухленточном режиме с регистрацией на одном коллекторе. Погрешность определения отношения  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  не превышает 1 ‰.

### Результаты исследований и обсуждение

Стабильные изотопы кислорода, водорода и углерода подземных вод и растворенной углекислоты

Как оказалось, значения  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  вод и водорастворенной углекислоты для нефтегазоносных отложений рассматриваемого региона мало изучены. Величины  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  позволяют определить генезис вод [11], исследовать процессы водосбора [12], взаимодействия вод с окружающими газами [13, 14] и породами (WRI – Water-rock interaction) [15–17].

Согласно литературным данным [12–16, 18 и др.] источником подземных вод в большинстве случаев выступают метеорные воды. Авторы работ [12, 16, 19] активно оперируют парой  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  для построения локальных линий метеорных вод – LMWL, отражающих среднегодовое соотношение между изотопами водорода и кислорода в метеорных водах конкретного региона. Как правило, при подобных построениях делается сравнение тренда LMWL с глобальной линией метеорных вод (GMWL), предложенной Г. Крейгом в 1961 г. [18] и описываемой уравнением:  $\delta\text{D}=8\cdot\delta^{18}\text{O}+10$ . Исходя из положения точек относительно линии Крейга, можно сделать выводы о климатических особенностях изучаемого региона в условиях осадконакопления [12], об интенсивности испарения вод и их газообмена с окружением [13], и о взаимодействии вод с породами.

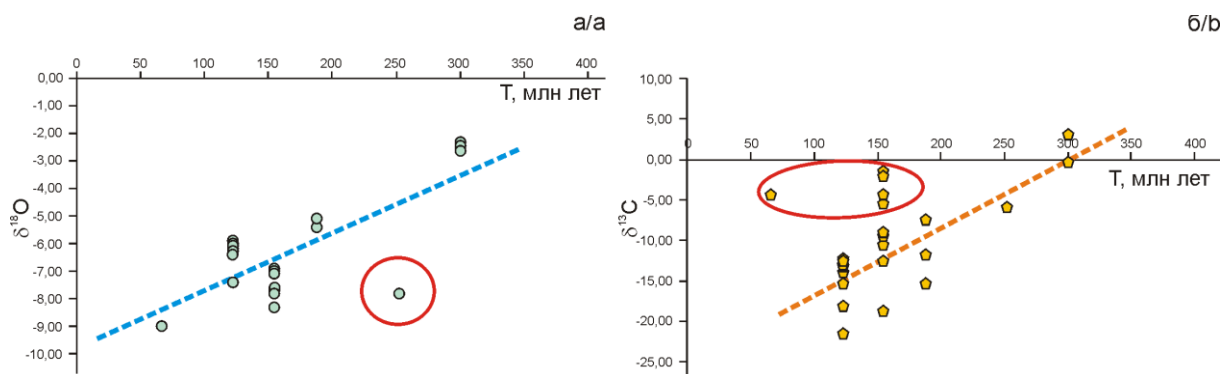
Результаты анализа стабильных изотопов O и H изученных вод нефтяных месторождений Новосибирской области представлены в таблице. Из таблицы видно, что для вод изученного региона характерна довольно узкая вариация значений  $\delta\text{D}$  (от  $-77,9$  ‰ до  $-61,7$  ‰) и  $\delta^{18}\text{O}$  (от  $-9,0$  ‰ до  $-5,1$  ‰). Анализ диаграммы  $\delta\text{D}=\text{f}(\delta^{18}\text{O})$  (рис. 1) показал, что для большинства исследованных вод пара  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  располагается значительно ниже как глобальной линии метеорных вод, так и LMWL:  $\delta\text{D}=7,5\cdot\delta^{18}\text{O}+5$  [20].

В литературе положительные отклонения от линии Крейга зачастую интерпретируют эффектом испарения вод, при котором происходит обеднение вод легким изотопом  $^{16}\text{O}$  [19, 21–23]. В работе [13] было показано, что при небольшой глубине водоема (до 1 м) в современных условиях эффект испарения может приводить к дефициту легкого изотопа кислорода до 4 ‰. Кроме эффекта испарения, положительные отклонения  $\delta^{18}\text{O}$  ряд исследователей объясняют изотопным обменом вод с окружающими породами [15–17]. Ве-

личина эффекта изотопного обмена кислородом вод при WRI определяется множеством факторов (температура, давление, время взаимодействия, тип пород, соотношение вода/порода) и может достигать в естественных условиях 8 ‰ [24]. Тем не менее столь существенные изотопные сдвиги наблюдаются лишь в системах с экстремальными условиями. Например, в работе [15] показано, что при равновесном обмене вод с породами при температурах выше 221 °C величина изотопного сдвига  $\delta^{18}\text{O}$  достигает примерно +5,5 ‰. В нашем случае положительное отклонение кислородной дельты составляет от +1,5 ‰ для вод Верхнеюрского и апт-альб-сеноманского комплексов Верх-Тарского месторождения (синий эллипс) и до +5,8 для вод ниже-среднеюрского комплекса Западно-Герасимовского месторождения (зеленый и оранжевый эллипсы). Отдельно стоит отметить воды палеозойского комплекса Малоичского месторождения, для которых профицит тяжелого изотопа  $^{18}\text{O}$  составляет феноменальные +(8,28–8,55) ‰ (красный эллипс).

Интересно отметить, что нарастание отклонения значений  $\delta^{18}\text{O}$  от линий метеорных вод коррелирует с возрастом водоносных комплексов (рис. 2, а). Причинами таких явлений могут быть как климатические изменения текущих условий относительно условий захоронения вод, так и процессы WRI.

Рассмотрим эти два фактора подробнее. Из данных, представленных на рис. 1, видно, что для двух проб положительный сдвиг значений  $\delta^{18}\text{O}$  очень незначителен и вполне достоверно описывается линией локальных метеорных вод (синий эллипс). Повидимому, для этих двух проб, несмотря на довольно большую глубину залегания комплексов (734–1532 м для вод апт-альб-сеноманского и 2522–2532 м для вод верхнеюрского комплексов Верх-Тарского месторождения) характерно смешивание с метеорными водами. Как известно, апт-альб-сеноманские отложения изучаемого региона формировались преимущественно в континентальных фациях и их воды имеют древний инфильтрационный генезис [25]. При разработке нефтяной залежи Ю<sub>1</sub> Верх-Тарского месторождения на начальных этапах в качестве агента заводнения выступали воды апт-альб-сеномана. Поэтому получаемые значения пары  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  изученных проб отражают процессы этого смешения. Аналогичный эффект смешивания вод древних комплексов с более молодыми, вероятно, проявляется и для образца, отобранного в зоне контакта палеозойского фундамента и мезозойского осадочного чехла (НГТЗК) Верх-Тарского месторождения: несмотря на большой возраст вмещающих пород, значение  $\delta^{18}\text{O}$  остается на уровне вод верхнеюрского комплекса (рис. 2, а, красный эллипс), в то время как при переходе к водам более древних комплексов наблюдается явное насыщение кислорода вод изотопом  $^{18}\text{O}$ .



**Рис. 2.** Изменение значений  $\delta^{18}\text{O}$  (а) и  $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  (б) изученных вод в зависимости от возраста вмещающих отложений. Линии – обобщающие тренды. Красными эллипсами выделены точки, значительно отклоняющиеся от общей корреляции

**Fig. 2.** Changes in the ratios of  $\delta^{18}\text{O}$  (a) and  $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  (b) values of the studied samples depending on the age of the host sediments. Lines reflect the generalizing trends. The points that deviate significantly from the general correlation are marked with red ellipses

**Таблица.** Изотопные характеристики подземных вод разрабатываемых месторождений Новосибирской области  
**Table.** Isotopic characteristics of groundwaters of the developed deposits of the Novosibirsk region

№ пробы Sample no.	Месторождение Field	Комплекс Complex	T, °C	M, г/дм <sup>3</sup> TDS, g/l	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (VPDB), ‰	$\delta\text{D}_{(\text{VSMOW})}$ , ‰	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{VSMOW})}$ , ‰	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	±2SD
6	I	A	40	22	-4,4	-74,3	-9,0	0,00291	0,70652	0,00002
2439	IV	B	82	18	-18,1	-61,7	-5,9	-	-	-
2440	IV		82	21	-13,2	-64,9	-6,0	-	-	-
2441	IV		82	16	-12,6	-68,9	-6,0	0,01114	0,70708	0,00001
2470	V		94	15	-13,4	-64,3	-6,2	-	-	-
2471	V		94	13	-14,0	-65,4	-6,3	-	-	-
2525	IV		82	13	-15,4	-70,3	-6,2	-	-	-
2526	IV		82	16	-21,6	-74	-7,4	-	-	-
2527	IV		82	21	-13,2	-68,3	-6,1	-	-	-
2528	VI		81	16	-12,4	-69,8	-6,4	0,00976	0,70530	0,00007
115	I		C	91	34	-9,1	-72,8	-7,7	-	-
145	I	88		28	-10,5	-70,4	-8,3	-	-	-
152	I	88		36	-18,8	-71,8	-6,9	-	-	-
162	I	92		34	-5,5	-70,7	-7,1	0,00230	0,70654	0,00003
172	I	94		35	-9,5	-74,7	-7,8	0,00197	0,70657	0,00004
375	I	89		38	-9,1	-69,5	-7,7	0,00235	0,70610	0,00005
379	I	93		38	-4,4	-71,5	-7,0	0,00231	0,70664	0,00006
1015	I	90		46	-1,4	-70,8	-7,1	0,00223	0,70659	0,00003
19	II	81		38	-12,6	-71,1	-7,6	-	-	-
102	II	81		36	-2,0	-70,1	-7,7	0,00223	0,70644	0,00003
2522	VII	D	96	22	-15,4	-68,7	-5,4	-	-	-
2523	VII		96	22	-7,4	-77	-5,1	0,01111	0,70638	0,00007
2524	VII		96	21	-11,8	-77,9	-5,4	-	-	-
700	I	E	109	37	-6,0	-71,5	-7,8	0,00277	0,70614	0,00004
25	III	F	94	72	-0,4	-76,8	-2,3	-	-	-
11	III		94	70	3,1	-77,3	-2,5	0,00988	0,70778	0,00004
27	III		94	71	-0,3	-77,0	-2,6	-	-	-

Примечание: месторождения: I – Верх-Тарское, II – Восточно-Тарское, III – Малоичское, IV – Северо-Кеумское, V – Среднекеумское, VI – Юганское (11 лицензионный участок), VII – Западно-Герасимовское; водоносный комплекс: A – апт-альб-сеноманский, B – неокомский, C – верхнеюрский, D – нижне-среднеюрский, E – зона контакта с палеозоем (НГГЗК), F – девонский; «-» – не определяется.

Note: fields: I – Verkh-Tarskoe, II – Vostochno-Tarskoe, III – Maloichskoe, IV – Severo-Keumskoe, V – Srednekeumskoe, VI – Yuganskoe (11 licensed area), VII – Zapodno-Gerasimovskoe; aquifer: A – Aptian-Albian-Cenomanian, B – Neocomian, C – Upper Jurassic, D – Lower-Middle Jurassic, E – contact zone with the Paleozoic (NGGZK), F – Devonian; «-» – not determined.

Так, для вод неокомского и верхнеюрских комплексов исследованных месторождений можно наблюдать уже существенное положительное отклонение изотопного состава кислорода, варьирующее от +2,3 до 3,8 ‰ (рис. 1, зеленый эллипс). Согласно работе [26] в тоарском веке (182,7–174,1 млн лет) кли-

мат претерпевал существенные изменения: температура и влажность воздуха увеличились скачкообразно относительно поздне триасовой – раннеюрской фазы холодов [27]. Очевидно, что рост среднегодовой температуры при смене геологических эпох должен был способствовать прогрессированию эффекта испаре-

ния вод с поверхностей древних водоемов, из которого следует повышенная влажность воздуха древнего климата и, что важнее в нашем случае, сильное обеднение вод этих водоемов легкими изотопами кислорода. Логично предположить, что при захоронении сингенетических вод значения  $\delta^{18}\text{O}$  в них должны быть смещены относительно современной GMWL в положительную сторону. При этом чем больше была температура гипотетического древнего климата, тем сильнее должен быть изотопный кислородный сдвиг относительно линии Крейга. На рис. 1 можно видеть, что для проб, отобранных из нижне-среднеюрского комплекса (оранжевый эллипс), отвечающих как раз гипотетическому скачкообразному потеплению климата в тоарском веке, наблюдается дальнейшее увеличение положительного сдвига  $\delta^{18}\text{O}$ . Еще больший дефицит изотопа  $^{16}\text{O}$  наблюдается для вод девонских отложений Малоичского месторождения (красный эллипс). Девон является довольно спорной с точки зрения климата и температур эпохой, учитывая активную вулканическую деятельность. Отсюда многие работы указывают на то, что в это время температура атмосферы была в среднем выше текущей среднегодовой. Так, симуляции изменения температуры в течение девонского периода, основанные на вариации содержания  $\text{CO}_2$  в древней атмосфере, показали, что средняя температура поверхности Земли оставалась очень близка к постоянной: 23,4, 23,5 и 22,2 для LP1, LP2 и LP3, соответственно [28]. А в работе [29] было показано, что средняя температура поверхности океана в верхнедевонское время колебалась в диапазоне 27–34 °С. Наиболее наглядно выглядит зависимость температурных аномалий девонского периода, представленная авторами работы [30], согласно которой положительные отклонения температуры атмосферы относительно современной в период 350–420 млн лет составляли от 0 до 6 °С. Как отмечено выше, в нашем случае захороненные воды относятся к комплексам с положительными климатическими температурными сдвигами относительно современных условий. Вероятно, относительно более высокая температура климата во времена захоронения сингенетических вод сыграла определенную роль в изменении изотопного состава кислорода и привела к его положительному сдвигу относительно GMWL.

Тем не менее столь значительные отклонения значений  $\delta^{18}\text{O}$ , наблюдаемые для изученных объектов (особенно в случае вод девонского комплекса), по-видимому, не могут быть результатом исключительно климатических изменений. Принимая во внимание довольно высокие температуры исследованных вод и длительный период взаимодействия вод с вмещающими породами, можно сделать предположение об изменении изотопного состава кислорода вод, в том числе и за счет взаимодействия в системе «вода-порода» – WRI. При этом с увеличением возраста водовмещающих пород пропорционально растет и содержание тяжелого изотопа  $^{18}\text{O}$  в водах (рис. 2, а). Как уже было описано ранее, для систем с экстремальными условиями (высокие температуры и давления) положительные изотопные сдвиги кислорода вод

могут достигать в естественных условиях 8 ‰ [24]. Тем не менее для достижения подобных изотопных эффектов температура вод должна превышать 200 °С. В нашем случае, при современных температурах вод от 40 до 109 °С (таблица), величина изотопного сдвига кислорода в водах девонского комплекса составляет более 8 ‰. Наиболее достоверным объяснением подобных аномальных проявлений изотопного состава представляется сочетание двух влияющих факторов: 1) исходное обеднение вод легким изотопом  $^{16}\text{O}$  в период «до захоронения» на величину до 4–5 ‰ в результате климатического воздействия; 2) дальнейшее насыщение вод тяжелым изотопом  $^{18}\text{O}$  в ходе длительного WRI, приведшее к утяжелению изотопного состава при умеренных условиях на дополнительные 2–3 ‰.

Интерпретацию взаимодействия вод с окружением, в том числе и WRI, зачастую проводят на основании значений  $d^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , поскольку круг источников гидрокарбонат-иона в природных водах ограничен, хотя и довольно разнообразен: атмосферный  $\text{CO}_2$  [14, 31–33], биогенная углекислота, выделяемая растениями (вегетационная) [34] и микроорганизмами (бактериальная) [35] в результате их жизнедеятельности и переработки органического вещества [36], выветривание карбонатных и силикатных пород [31], почвенный  $\text{CO}_2$  [37], гидрокарбонат-ион, образуемый при гидролизе алюмосиликатов [31] и растворении карбонатов [36, 37]. В ряде случаев приходится также учитывать техногенные источники [14]. Разумеется, что полный спектр перечисленных источников углекислоты в природных водах встречается редко. В большинстве случаев доминирует лишь часть из них, при этом вклад остальных остается на следовом уровне и, как правило, не учитывается. Так, в нашем случае становится очевидным, что основными источниками углекислоты пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области могут служить лишь несколько: биогенная (бактериальная) углекислота,  $\text{CO}_2$ , высвобождаемый при углефикации и термическом распаде органического вещества, а также диоксид углерода, формируемый при гидролизе алюмосиликатов и растворении карбонатов. Такие источники, как атмосферный углекислый газ, вегетативная углекислота и почвенный  $\text{CO}_2$ , пенетрирующие, очевидно, лишь на небольшие глубины, в формировании DIC изученных подземных вод принимают минимальное участие.

Принимая во внимание «нефтяное происхождение» исследуемых вод, можно сделать вывод о преобладании бактериальной активности в процессах формирования DIC: обилие органического вещества, анаэробные условия и закрытый резервуар должны способствовать развитию бактериальных колоний и прогрессированию их жизнедеятельности. Тем не менее стоит упомянуть неблагоприятные для типичной бактериальной активности температурные условия рассматриваемых водоносных комплексов. Процессы, связанные с биологическим преобразованием органического вещества (ОВ), очень сложны и включают в себя многостадийные процессы: гидролиз, кислотоген-



нез, ацетогенез и метаногенез [38, 39]. При этом нормальными условиями для функционирования бактериальных систем считаются 55–60 °С, в то время как для исследуемых систем диапазон температур существенно выше (в среднем от 81 до 109 °С) и, по-видимому, непригоден для жизнедеятельности типичных бактерий-гетеротрофов. Исключение составляют лишь воды апт-альб-сеноманского комплекса Верх-Тарского месторождения, температура которых составляет 40 °С. Но, как уже упоминалось ранее, низкая температура вод этого комплекса может быть следствием смешения сингенетических вод комплекса с метеорными. Исходя из вышеописанного, биогенное (бактериальное) происхождение растворенной в водах углекислоты, на первый взгляд, представляется маловероятным.

Изотопные концентрации углерода-13 в DIC исследованных вод находятся в довольно широком интервале значений и колеблются от –21,6 до +3,1 ‰ (таблица). При этом наблюдается закономерное обогащение значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  тяжелым изотопом  $^{13}\text{C}$  при переходе от вод молодых комплексов к более древним (рис. 2, б). На первый взгляд, вопрос происхождения DIC и значений его изотопных дельт остается не вполне понятным. Преобразование ОВ в углекислоту без непосредственного участия биоты затруднительно. Изотопная характеристика термальных источников различных регионов мира показывает, что в большинстве случаев значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  колеблются в намного более узких интервалах значений: от –8,4 до +1,7 ‰ для источников Ладакха, Хамачал [40], Гарвальских Гималаев [41] в Индии, от –2,3 до +4,7 ‰ для Йеллоустонских источников и связанных с ними травертинов [42] в США, –8,4 ‰ в водах Фитеро [43] в Испании, от +6,26 до +8,07 ‰ в термальных водах Памуккале (Турция) [44], от –0,1 до +3,5 ‰ для источника Эрегсалок в Венгрии [45]. Получаемый диапазон значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  авторы трактуют как результат смешения метеорных вод с углекислотой метаморфических флюидов. Считается, что высвобождающийся при дегазации мантии  $\text{CO}_2$  имеет значения  $\delta^{13}\text{C} \sim -8$  ‰ VPDB [41, 46]. В работе [47] дается диапазон от –1,6 до –10,8 ‰. Протекающие коровые процессы и связанные с ними процессы метаморфической декарбонатации приводят к обогащению отношения тяжелым изотопом  $^{13}\text{C}$  и смещению изотопного отношения до положительных значений. В целом для диапазона  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  термальных вод от –8 до +4 ‰ VPDB вклад биологической активности принимается несущественным [40, 41, 48].

В работе [49] исследованы термальные воды Непала со значениями  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , варьирующими в более широком диапазоне: от –13,0 до +13,5 ‰. Авторы работы предполагают, что подобное обогащение изотопного отношения углерода легким изотопом вызвано термическим распадом органического вещества. Вероятно, в случае исследованных в настоящей работе подземных вод можно сделать предположение об участии термического распада органического вещества (а также его углефикации с высвобождением ор-

ганогенной углекислоты) в формировании изотопного состава  $\text{C}_{\text{DIC}}$ . Однако полученные в нашем случае глубоко отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  пластовых вод не типичны для термальных низкотемпературных вод. Здесь же важно подчеркнуть, что для более молодых комплексов, имеющих более отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , характеры меньше температуры вод. Последний факт явно расходится с гипотезой термического распада органического вещества: логично полагать, что с повышением температуры проявление данного механизма должно было бы усиливаться, а в нашем случае наблюдается противоположная картина – с ростом температуры водорастворенная углекислота насыщается тяжелым изотопом  $^{13}\text{C}$ . Одним из вариантов для объяснения данного феномена могут служить колонии пока что малоизученных с изотопной точки зрения термостойких археев. Так, авторам работы [50] удалось выделить из термальных грязевых источников Камчатки штамм анаэробных гипертермофильных органогетеротрофных археев, жизнеспособных в экстремальных условиях: оптимальными условиями роста штамма были температура в 92 °С при pH от 6,0 до 6,5. В работе [51] для штамма Камчатских микроорганизмов был установлен температурный интервал активного роста от 80 до 95 °С с оптимумом при 84 °С. Интересно отметить, что основными продуктами биологической активности служили  $\text{CO}_2$ , ацетат и  $\text{H}_2$ , а при температурах 75 и 98 °С и pH 6,2 и 8,6 роста колонии не наблюдалось. Иными словами, развитие подобных археев требует довольно узкого, но при этом экстремального для других видов микроорганизмов термального режима, а продуктами их жизнедеятельности является  $\text{CO}_2$ , наследующий, по меньшей мере отчасти, изотопный состав перерабатываемого ОВ. Аналогичные термофильные микроорганизмы были обнаружены при отборе устьевой пробы в скважине из отложений юрского возраста в Парабельском районе Томской области [52], способные расщеплять целлюлозу и ее производные и развиваться как в аэробных, так и в анаэробных условиях.

Экстраполируя вышеизложенные данные на исследованные в настоящей работе подземные воды, можно предположить наличие колоний подобных термофильных микроорганизмов и в нашем случае. В пользу этой гипотезы свидетельствует то, что наиболее отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  характерны для вод, имеющих условия, очень близкие к благоприятным для проживания вышеуказанных археев (таблица): во всех изученных водах значения pH относятся к благоприятному диапазону, а температуры не превышают 90 °С. Для вод, температура которых превышает 90 °С, наблюдается явное утяжеление изотопного состава  $\text{C}_{\text{DIC}}$  до величин, отвечающих «нормальным» значениям  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  в термальных водах: от –8 до +4 ‰ VPDB. Ряд отклоняющихся от общей корреляции точек (рис. 2, б, красный эллипс), по-видимому, обусловлен разбавлением и/или смешением вод различных водоносных горизонтов и изменением термических условий, способных оказать влия-

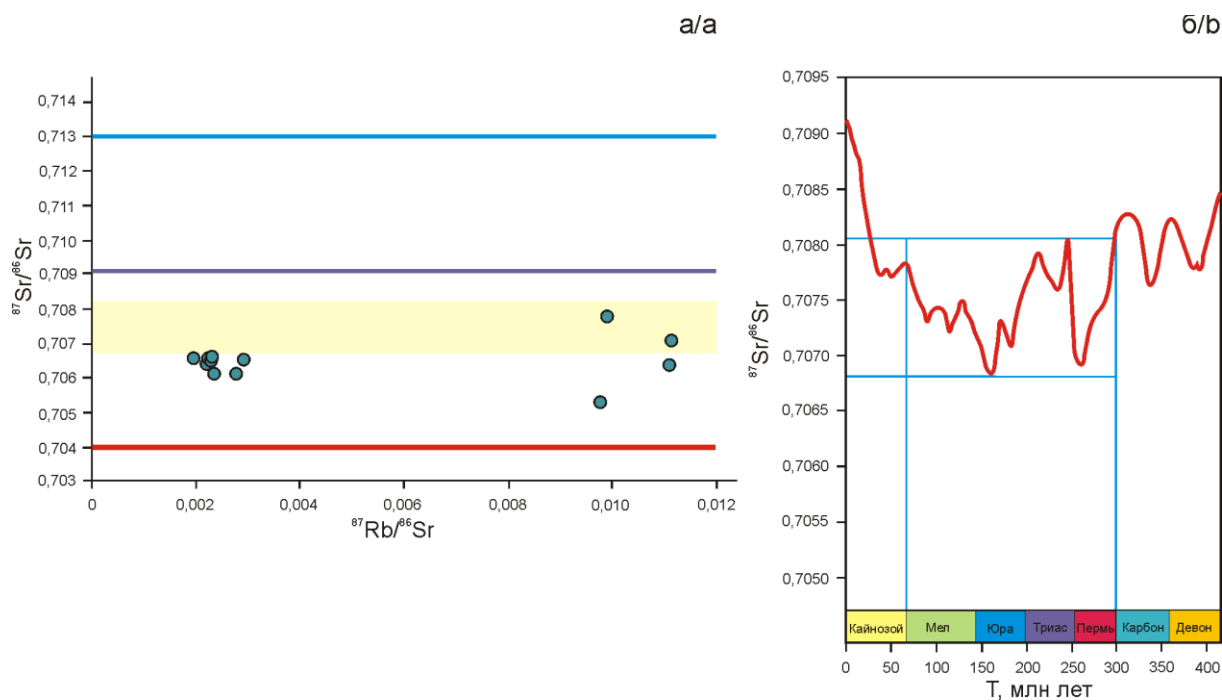
ние на жизнедеятельность гипотетических колоний термофильных археев. Тем не менее наличие термофильных микроорганизмов в изученных подземных водах носит на данный момент гипотетический характер и требует дополнительных исследований с привлечением соответствующих специалистов – микробиологов.

#### Изотопы стронция

Изотопные отношения стронция являются показательным трассером важных гидрогеологических процессов, таких как WRI и выявление разгрузки подземных вод в активных разломах [53]. Отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  вод изменяются в соответствии с вариацией отношения  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  и возраста дренируемого водоносного комплекса. При этом такие природные процессы, как растворение и осаждение, не фракционируют изотопы стронция [54]. Обогащение отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  радиогенным изотопом  $^{87}\text{Sr}$  происходило с течением времени при радиоактивном распаде  $^{87}\text{Rb}$ . Исходное соотношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  на момент аккреции Земли составляло 0,69897 [55] и постепенно нарастало до современных значений. Источником радиогенного  $^{87}\text{Sr}$  в подземных водах могут служить как воды палеоокеана, характеризующиеся определенным соотношением  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  [56], так и рубидий, попадающий в воды из окружающих пород в ходе процессов выветривания [57, 58]. В свою очередь, соотношение изотопов стронция в океанической воде в геологической шкале времени определялось балансом двух источников: 1 – обогащение вод изотопом  $^{87}\text{Sr}$  при континентальном выветривании пород, обогащенных как  $^{87}\text{Rb}$ , так и дочерним  $^{87}\text{Sr}$ ; 2 – обеднение соотношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  тяжелым изотопом  $^{87}\text{Sr}$  при гидротермальном обмене в срединноокеанических хребтах и гидротермальных альтерациях подводных базальтов, породы которых имеют более низкие значения отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  [59]. Выветриваемый материал континентальных пород вымывался временными водотоками, обогащая воды тяжелым изотопом  $^{87}\text{Sr}$ . С изменением климатических условий варьировали интенсивности таких процессов, как оледенение, образование осадков, формирование водных потоков и выветривание пород. Это приводило, в свою очередь, к изменению интенсивности притока поверхностных вод, обогащенных изотопом  $^{87}\text{Sr}$ , к водам мирового океана и, соответственно, изменению отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  морской воды с течением времени. Немаловажное влияние на процесс изменения стронциевых отношений при химическом выветривании оказали тектонические процессы объединения и разрушения суперконтинента и формирование обширных базальтовых провинций [58]. Сочетание вышеописанных процессов приводило к широкому варьированию изотопного соотношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  мирового океана, приводящее к тому, что морские воды ряда геологических периодов и эпох имеют очень близкие значения стронциевых отношений. Например, современные воды мирового океана, имеющие  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0,7091$ , очень близки по этому параметру к водам кембрийского палеоокеана [56]. Формирование земной коры, как правило, со-

провождается широким спектром пересеченных и наложенных друг на друга геологических процессов – тектонических, магматических, метаморфических, приводящих к сложно-интерпретируемым запутанным системам. Тем не менее общая закономерность такова, что более древние породы в среднем обладают более высокими значениями изотопного отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  [60]. Выветривание подобных сложных систем приводит к еще более неоднозначному дисбалансу в соотношениях изотопов стронция. Поэтому при интерпретации изотопии стронция в водах авторы зачастую делают выводы не о возрасте вод, а об источниках, сформировавших анализируемый изотопный состав отношений  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  [54, 57–62], иными словами, выводы относительно взаимодействия в системе «вода – горная порода».

В таблице и на рис. 3, а представлены данные по изотопным отношениям  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для части исследованных вод. Выборка была сделана для вод предпочтительно разновозрастных комплексов. Из представленных данных видно, что для всех исследованных вод соотношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  находится ниже уровня вод современного океана (рис. 3, а, оранжевая линия). По-видимому, это указывает на отсутствие инфльтрационного питания обогащенных тяжелым изотопом  $^{87}\text{Sr}$  вод, величина  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  которых, как правило, варьирует от 0,7116 до 0,7119 [58, 62]. Вероятно, это может служить аргументом в пользу положения об изолированности исследуемых вод от внешних метеорных источников. Более того, величины изотопного отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  большинства исследованных вод имеют очень низкие значения. Разумеется, необходимо принимать во внимание тот факт, что на момент захоронения вод стронциевые изотопные отношения могли и должны были существенно отличаться от современных. Согласно [56], колебания  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  вод в период 300–66 млн лет происходило в диапазоне 0,7068–0,7081 (рис. 3, б). При условии отсутствия внешних источников  $^{87}\text{Rb}$  воды должны были постепенно обогащаться изотопом  $^{87}\text{Sr}$  в ходе радиоактивного распада растворенного в воде рубидия и отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  захороненных вод должно было постепенно увеличиваться. Сложно точно оценить величину такого прироста, поскольку точный возраст захороненных вод, равно как и их исходный состав  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ , неизвестны. Тем не менее логично ожидать некоторое увеличение значений относительно указанных рамок – 0,7068–0,7081. Из представленных данных видно, что большая часть значений стронциевых отношений находится не только внутри этих рамок, но в некоторых случаях даже меньше нижней границы – 0,7068. Вероятным объяснением этого явления может служить обогащение вод стронцием из мантийного (не радиогенного) источника, современное отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в котором составляет 0,704 [59]. В результате смешения стронция исходных захороненных вод с мантийным источником гипотетический прирост отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  относительно диапазона 0,7068–0,7081 был, по-видимому, нивелирован, а в большинстве случаев оказался отрицательным.



**Рис. 3.** Соотношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  в изученных водах (а) и вариация изотопного отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в водах мирового океана с течением времени (б) (по [56]). Фиолетовая линия – изотопное соотношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в водах современного океана [56]; красная линия –  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в мантийном источнике [59]; синяя линия –  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в современной Земной коре [59]. Желтым выделена область значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , соответствующих водам мирового океана в период 300–66 млн лет [56]

**Fig. 3.**  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  ratios in the studied waters (a) and variation of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic ratio in the waters of the World Ocean (b) (according to [56]). The purple line is the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotope ratio in the waters of the modern ocean [56]; red line –  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in the mantle source [59]; blue line –  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in the modern Earth's crust [59]. The range of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values corresponding to the waters of the world ocean in the period 300–66 Ma is highlighted in yellow [56]

Изученные воды характеризуются еще одной интересной особенностью. Из рис. 3, а видно, что все они условно подразделены на две группы: 1) с высоким содержанием  $^{87}\text{Rb}$  (воды неокомского комплекса Северо-Кеумского и Юганского месторождений, воды ниже-среднеюрского комплекса Западно-Герасимовского месторождения и палеозойские воды Малоичского месторождения); 2) с низким содержанием радиоактивного изотопа  $^{87}\text{Rb}$  (остальные). Вероятно, для вод с высоким содержанием  $^{87}\text{Rb}$  на момент захоронения произошло накопление материала выветривания, обогащенного рубидием. В дальнейшем, в ходе радиоактивного распада, воды насыщались тяжелым изотопом  $^{87}\text{Sr}$ , что наглядно иллюстрируется образцами Малоичского и Северо-Кеумского месторождений. В случае вод Юганского и Западно-Герасимовского месторождений влияние мантийного источника стронция оказалось, по-видимому, столь существенным, что полностью подавило обогащение вод изотопом  $^{87}\text{Sr}$ , высвобождающимся при распаде  $^{87}\text{Rb}$ . Воды разрабатываемых залежей горизонта Ю<sub>1</sub> Верх-Тарского и Восточно-Тарского месторождений за счет процессов смешения с агентом заводнения во многом унаследовали изотопный состав стронциевых отношений апт-альб-сеноманских вод.

#### Заключение

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

1. Для вод изученного региона характерна довольно узкая вариация значений  $\delta\text{D}$  (от  $-77,9\text{‰}$  до  $-61,7\text{‰}$ ) и  $\delta^{18}\text{O}$  (от  $-9,0\text{‰}$  до  $-5,1\text{‰}$ ). Анализ данных показал, что для большинства исследованных вод пара  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  располагается значительно ниже глобальной линии метеорных вод, что говорит о наличии в гидрогеологическом разрезе двух основных генетических типов подземных вод: древних инфильтрационных и седиментогенных [63, 64]. Величина изотопного сдвига О достигает от  $+1,5\text{‰}$  до  $+(8,28-8,55)\text{‰}$ . Наиболее достоверным объяснением подобных аномальных проявлений изотопного состава представляется сочетание двух влияющих факторов: исходное обеднение вод легким изотопом  $^{16}\text{O}$  в период «до захоронения» на величину до  $4-5\text{‰}$  в результате климатического воздействия; дальнейшее насыщение вод тяжелым изотопом  $^{18}\text{O}$  в ходе длительного WRI, приведшее к утяжелению изотопного состава при умеренных условиях на дополнительные  $2-3\text{‰}$ .
2. Концентрации углерода-13 в DIC исследованных вод находятся в довольно широком интервале значений и колеблются от  $-21,6$  до  $+3,1\text{‰}$ . Установлено закономерное обогащение значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  тяжелым изотопом  $^{13}\text{C}$  при переходе от вод молодых комплексов к более древним. Предполагается наличие в изученных водах колоний термофильных микроорганизмов, приводящее к легкому изотопному составу углерода DIC при

переработке ОВ. Для вод, температура которых превышает 90 °С, наблюдается явное утяжеление изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  до величин, отвечающих «нормальным» значениям  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  в термальных водах: от –8 до +4 ‰ VPDB.

3. Совместный анализ изотопных отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  изученных вод указывает на то, что захоронение вод происходило как минимум двумя большими группами. Первая группа вод оказалась максимально изолированной от внешних источников радиоактивного  $^{87}\text{Rb}$  и в ходе WRI в первую очередь обогащалась стронцием из мантийных источников. Вторая группа вод была захоронена в присутствии обильного количества материала выветривания континентальной коры, богатого радиоактивным  $^{87}\text{Rb}$ . За период захоронения в ходе WRI происходило обогащение вод

рубидием  $^{87}\text{Rb}$  и его дочерним изотопом  $^{87}\text{Sr}$ . Для всех вод характерно низкое значение отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  относительно вод современного океана, что указывает на значительный вклад мантийных источников стронция, проявляющегося, тем не менее, в разной степени для вод различных месторождений. За счет процессов смешения с агентом заводнения воды разрабатываемых залежей горизонта Ю<sub>1</sub> Верх-Тарского и Восточно-Тарского месторождений во многом унаследовали изотопный состав стронциевых отношений апт-альб-сеноманских вод.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025 и проекта Российской фонда фундаментальных исследований и Правительства Новосибирской области № 19-45-540006.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
2. Нефтегазоносность верхней части палеозоя юго-востока Западно-Сибирской плиты / В.И. Биджаков, Е.Е. Даненберг, И.А. Иванов, Г.И. Тищенко // Нефтегазоносность Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: СО РАН, 1981. – С. 116–121.
3. Геологические условия нефтегазоносности верхней части палеозойского разреза Западной Сибири (на примере Межевского срединного массива) / А.Э. Конторович, И.А. Иванов, А.Е. Ковешников, В.И. Краснов, Г.Н. Перозин // Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа. – Новосибирск: СО РАН, 1991. – С. 152–171.
4. Contemporary development state of reservoir Yu1, the Verkh-Tarskoe oilfield (south of Western Siberia) / Novikov D.A., Pavlova S.A., Yu Kuznetsov D., Ryzhkova S.V., Chernikov A.A. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1451 (1). – 012008.
5. Месторождения (разрабатываемые). URL: <https://www.novng.ru/production/deposits/> (дата обращения 10.08.2020).
6. О геотермической зональности нефтегазоносных отложений северо-западных районов Новосибирской области / Д.А. Новиков, С.В. Рыжкова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Вузов. Нефть и газ. – 2018. – № 5. – С. 69–76.
7. Нефтегазовая гидрогеохимия доюрских комплексов южных районов Обь-Иртышского междуречья / Д.А. Новиков, С.В. Рыжкова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, К.В. Сесь, Н.А. Ефимцев, А.Е. Шохин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 39–54.
8. Гидродинамические особенности нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, С.В. Рыжкова // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 4. – С. 85–94.
9. Геохимия водорастворенных газов нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья / Д.А. Новиков, А.Е. Шохин, А.А. Черников, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Вузов. Нефть и газ. – 2019. – № 4 (136). – С. 70–81.
10. Прогноз нефтегазоносности юрских и палеозойских отложений южных районов Западно-Сибирского бассейна / Я.В. Садыкова, М.А. Фомин, С.В. Рыжкова, Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 114–127.
11. Stable water isotope modeling reveals spatio-temporal variability of glacier meltwater contributions to Ganges River headwaters / S. Boral, I.S. Sen, D. Ghosal, B. Peucker-Ehrenbrink, J.D. Hemingway // Journal of Hydrology. – 2019. – V. 577. – 123983.
12. Swetha T.V., Gopinath G., Resmi T.R. Isotope mass balance estimation of groundwater recharge in a hard rock tropical river basin in Kerala, India // Groundwater for Sustainable Development. – 2020. – V. 11. – 100422.
13. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil–vegetation–atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration // Physics and Chemistry of the Earth. – 2010. – V. 35. – P. 565–570.
14. Sources and sinks of dissolved inorganic carbon in an urban tropical coastalbay revealed by  $\delta^{13}\text{C}$ -DIC signals / L.C. Cotovicz Jr., B.A. Knoppers, L. Deirmendjian, G. Abril // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2019. – V. 220. – P. 185–195.
15. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction / R.M. Shoedarto, Y. Tada, K. Kashiwaya, K. Koike // Geothermics. – 2020. – V. 86. – 101797.
16. Isotope ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) and chemical (B, Cl) Constrains on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water / A. Stefánsson, S. Arnórsson, A.E. Sveinbjörnsdóttir, J. Heinemaier, H. Kristmannsdóttir // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 108. – 104380.
17. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2020. – V. 390. – 106708.
18. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
19. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition ( $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$ ) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain) / B. Andreo, C. Linan, F. Carrasco, C. Jimenez de Cisneros, F. Caballero, J. Mudry // Applied Geochemistry. – 2004. – V. 19. – P. 561–574.
20. Shemelina O., Sanchaa A., Faguet A. Isotopic characteristics ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ ) of surface and groundwater as an additional tool for searching quality drinking water (Western part of Novosibirsk Region, Russia) // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – 012019.
21. Chemo-isotopes ( $^{18}\text{O}$  &  $^2\text{H}$ ) signatures and HYSPLIT model application: clues to the atmospheric moisture and air mass origins / R. Bagheri, F. Bagheri, G.H. Karami, H. Jafari // Atmospheric Environment. – 2019. – V. 215. – 116892.
22. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) / D. Chafouq, A.El. Mandour, M. Elgettafi, M. Himi, I. Chouikri, A. Casas // Journal of African Earth Sciences. – 2018. – V. 139. – P. 1–13.
23. Spatial distribution and controlling factors of surface water stable isotope values ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$ ) across Kazakhstan, Central Asia / H. Wu, J. Wu, F. Song, J. Abuduwaili, A.S. Saparov, X. Chen, B. Shen // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 678. – P. 53–61.

24. Nicholson K. Geothermal fluids, chemistry and exploration techniques. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag Publ., 1993. – 223 p.
25. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде / А.Э. Конторович, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, Ю.Н. Карогодин, В.А. Конторович, Н.К. Лебедева, Б.Л. Никитенко, Н.И. Попова, Б.Н. Шурыгин // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 745–776.
26. Carbon sequestration in an expanded lake system during the Toarcian oceanic anoxic event / W. Xu, M. Ruhl, H.C. Jenkyns, S.P. Hesselbo, J.B. Riding, D. Selby, B.D.A. Naafs, J.W.H. Weijers, R.D. Pancost, E.W. Tegelaar, E.F. Idiz // Nature Geoscience. – 2017. – V. 10. – P. 129–135.
27. Jurassic paleogeography of the Tian Shan: an evolution driven by far-field tectonics and climate / J. Morin, M. Jolivet, C. Robin, G. Heilbronn, L. Barrier, S. Bourquin, Y. Jia // Earth-Science Reviews. – 2018. – V. 187. – P. 286–313.
28. The climate change caused by the land plant invasion in the Devonian / G.L. Hir, Y. Donnadieu, Y. Godderis, B. Meyer-Berthaud, G. Ramstein, R.C. Blakey // Earth and Planetary Science Letters. – 2011. – V. 310. – P. 203–212.
29. Huang C., Joachimski M.M., Gong Y. Did climate changes trigger the Late Devonian Kellwasser Crisis? Evidence from a high-resolution conodont  $\delta^{18}\text{OPO}_4$  record from South China // Earth and Planetary Science Letters. – 2018. – V. 495. – P. 174–184.
30. CO<sub>2</sub> as a primary driver of Phanerozoic climate / D.L. Royer, R.A. Berner, I.P. Montañez, N.J. Tabor, D.J. Beerling // Geological Society of America Today. – 2004. – V. 14. – № 3. – P. 4–10.
31. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: Sources of DIC and their magnitudes // Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – V. 236. – Iss. 1–2. – P. 419–429.
32. Liu Z., Dreybrodt W., Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO<sub>2</sub> budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms // Earth-Science Reviews. – 2010. – V. 99. – № 3–4. – P. 162–172.
33. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO<sub>2</sub> / M. Górka, P.E. Sauer, D. Lewicka-Szczepak, M.-O. Jędrzysek // Environmental Pollution Volume. – 2011. – V. 159. – № 1. – P. 294–301.
34. Deirmendjian L., Abril G. Carbon dioxide degassing at the groundwater-stream-atmosphere interface: isotopic equilibration and hydrological mass balance in a sandy watershed // Journal of Hydrology. – 2018. – V. 558. – P. 129–143.
35. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico / J.W. Pohlman, C. Ruppel, D.R. Hutchinson, R. Downer, R.B. Coffin // Marine and Petroleum Geology. – 2008. – V. 25. – P. 942–951.
36. Origin of dissolved gas (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, alkanes) in pore waters of a clay formation in the critical zone (Tegulines Clay, France) / C. Lerouge, M. Debure, B. Henry, A.-M. Fernandez, M. Blessing, E. Proust, B. Made, J.-C. Robinet // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 116. – 104573.
37. Variations of soil CO<sub>2</sub> concentration and pCO<sub>2</sub> in a cave stream on different time scales in subtropical climatic regime / M. Cao, Y. Jiang, Y. Chen, J. Fan, Q. He // Catena. – 2020. – V. 185. – 104280.
38. Anaerobic digestion of renewable biomass: thermophilic temperature governs methanogen population dynamics / N. Krakat, A. Westphal, S. Schmidt, P. Scherer // Applied and Environmental Microbiology. – 2020. – V. 76. – Iss. 6. – P. 1842–1850.
39. Stable isotopes ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) and geochemical characteristics of geothermal springs of Ladakh and Himachal (India): evidence for CO<sub>2</sub> discharge in northwest Himalaya / S.K. Tiwari, S.K. Rai, S.K. Bartarya, A.K. Gupta, M. Negi // Geothermics. – 2016. – V. 64. – P. 314–330.
40. Tiwari S.K., Gupta A.K., Asthana A.K.L. Evaluating CO<sub>2</sub> flux and recharge source in geothermal springs, Garhwal Himalaya, India: stable isotope systematics and geochemical proxies // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – V. 27. – P. 14818–14835.
41. Friedman I. Some investigations of the deposition of travertine from Hot Springs – I. The isotopic chemistry of a travertine-depositing spring // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1970. – V. 34. – Iss. 12. – P. 1303–1315.
42. Stable isotope characterisation of recent aragonite travertine deposits associated with the Fitero thermal waters (Spain) / M. Blasco, L.F. Auqué, M.J. Gimeno, M.P. Asta, J. Mandado // International Journal of Earth Sciences. – 2020. – V. 109. – Iss. 3. – P. 877–892.
43. Origin and evolution of the thermal waters from the Pamukkale Geothermal Field (Denizli Basin, SW Anatolia, Turkey): insights from hydrogeochemistry and geothermometry / H. Alçiçek, A. Bülbül, İ. Yavuzer, M. Cihat Alçiçek // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2019. – V. 372. – P. 48–70.
44. Chemical and stable isotope composition of recent hot-water travertines and associated thermal waters, from Egerszalók, Hungary: depositional facies and non-equilibrium fractionation / S. Kele, A. Demény, Z. Siklósy, T. Németh, M. Tóth, M.B. Kovács // Sedimentary Geology. – 2008. – V. 211. – Iss. 3–4. – P. 53–72.
45. Marty B., Jambon A.  $\text{C}^3\text{He}$  in volatile fluxes from the solid Earth: implications for carbon geodynamics // Earth and Planetary Science Letters. – 1987. – V. 83. – Iss. 1–4. – P. 16–26.
46. C-He systematics in hotspot xenoliths: implications for mantle carbon contents and carbon recycling / T. Trull, S. Nadeau, F. Pineau, M. Polve, M. Javoy // Earth and Planetary Science Letters. – 1993. – V. 118. – Iss. 1–4. – P. 43–64.
47. Aqueous and isotope geochemistry of mineral springs along the southern margin of the Tibetan plateau: implications for fluid sources and regional degassing of CO<sub>2</sub> / D.L. Newell, M.J. Jessup, J.M. Cottle, D.R. Hilton, Z.D. Sharp, T.P. Fischer // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2008. – V. 9. – Iss. 8. – Q08014.
48. Evans M.J., Derry L.A., France-Lanord C. Degassing of metamorphic carbon dioxide from the Nepal Himalaya // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2008. – V. 9. – Iss. 4. – Q04021.
49. Complete genomic sequence of «Thermophilum adornatus» strain 1910bT, a hyperthermophilic anaerobic organotrophic crenarchaeon / I.N. Dominova, I.V. Kublanov O.A. Podosokorskaya, K.S. Derbikova, M.V. Patrushev, S.V. Toshchakov // Genome Announcements. – 2013. – V. 1. – Iss. 5. – e00726-13.
50. Thermogladus calderae gen. nov., sp. nov., an anaerobic, hyperthermophilic crenarchaeote from a Kamchatka hot spring / T.V. Kochetkova, I.V. Kublanov, S.V., Toshchakov M.R. Osburn, A.A. Novikov, E.A. Bonch-Osmolovskaya, A.A. Perevalova // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2016. – V. 66. – Iss. 3. – P. 1407–1412.
51. Characterization of Melioribacter roseus gen. nov., sp. nov., a novel facultatively anaerobic cellulolytic bacterium from the class Ignavibacteria, and a proposal of a novel bacterial phylum Ignavibacteriae / O.A. Podosokorskaya, V.V. Kadnikov, S.N. Gavrilov, A.V. Mardanov, A.Y. Merkel, O.V. Karnachuk, N.V. Ravin, E.A. Bonch-Osmolovskaya, I.V. Kublanov // Environmental Microbiology. – 2013. – V. 15. – Iss. 6. – P. 1759–1771.
52. New thermophilic prokaryotes with hydrolytic activities / E. Bonch-Osmolovskaya, A. Elcheninov, K. Zayulina, I. Kublanov // Microbiology Australia. – 2018. – V. 39. – Iss. 3. – P. 122–125.
53.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in shallow and deep aquifers and thermal water from the eastern boundary fault of the Northern Upper Rhine Graben at the Heidelberg Basin, Germany / G. Schmidt, S.A. Najem, M. Isenbeck-Schröter, F. Freundt, M. Kraml, R. Eichstadter, W. Aeschbach // Procedia Earth and Planetary Science. – 2017. – V. 17. – P. 108–111.
54. Petelet-Giraud E., Négrel P., Casanova J. Tracing mixings and water-rock interactions in the Loire River Basin (France):  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  // Procedia Earth and Planetary Science. – 2017. – V. 17. – P. 794–797.
55. Hans U., Kleine T., Bourdon B. Rb-Sr chronology of volatile depletion in differentiated protoplanets: BABI, ADOR and ALL revisited // Earth and Planetary Science Letters. – 2013. – V. 374. – P. 204–214.
56. McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. The Geologic Time Scale. Chapter 7 – Strontium Isotope Stratigraphy. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – P. 127–144.

57. Alexeev S., Alexeeva L., Shouakar-Stash O. Strontium isotopic ratio in brines from the north-east of the Angara-Lenskiy artesian basin // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – P. 12001.
58. Sr isotopic characteristics and fractionation during weathering of a small granitic watershed system in the Jihua Mountains (eastern China) / W. Weihua, S. Mingzhao, J. Xiang, Q. Shuyi // Journal of Hydrology. – 2019. – V. 568. – P. 135–146.
59. Korte C., Ullmann C.V. Permian strontium isotope stratigraphy // Geological Society London Special Publications. – 2016. – V. 450. – Iss. 1. – P. 105–118.
60. Banner J.L. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy // Earth-Science Reviews. – 2004. – V. 65. – Iss. 3–4. – P. 141–194.
61. Armstrong S.C., Sturchio N.C., Hendry M.J. Strontium isotopic evidence on the chemical evolution of pore waters in the Milk River aquifer, Alberta, Canada // Applied Geochemistry. – 1998. – V. 13. – P. 463–475.
62. Tracking multiple Sr sources through variations in  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of surface waters from the Aljustrel massive sulphide mining area: Geological versus anthropogenic inputs / A.T. Luis, N. Duraes, E. Ferreira da Silva, S. Ribeiro, A.J.F. Silva, C. Patinha, S.F.P. Almeida, M.R. Azevedo // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 102. – P. 108–120.
63. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – V. 44. – № 5. – P. 780–786
64. Novikov D.A. Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 193. – P. 012049.

Поступила 30.08.2020 г.

#### Информация об авторах

**Новиков Д.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Пыряев А.Н.**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; ассистент кафедры химической и биологической физики Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Черных А.В.**, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Дульцев Ф.Ф.**, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Рыжкова С.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем геологии, разведки и разработки месторождений трудноизвлекаемой нефти Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

UDK 556.314(571/5)

## THE FIRST DATA ON THE ISOTOPIC COMPOSITION OF STRATAL WATERS OF THE DEVELOPED OIL FIELDS IN NOVOSIBIRSK REGION

**Dmitry A. Novikov**<sup>1,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Aleksandr N. Pyrayev**<sup>3,2</sup>,  
pyrayev@igm.nsc.ru

**Anatoliy V. Chernykh**<sup>1</sup>,  
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

**Fedor F. Dultsev**<sup>1</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

**Svetlana V. Ryzhkova**<sup>1,2</sup>,  
RizhkovaSV@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB of RAS,  
3/6, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>3</sup> Institute of Geology and Mineralogy of SB RAS,  
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research lies in solving the issues of isotope geochemistry of groundwater in oil and gas deposits of large artesian basins. The waters of oil and gas bearing sediments of the region under consideration are practically not studied from the point of view of the distribution of stable isotopes  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C$  and isotopic ratios  $^{87}Sr/^{86}Sr$  and  $^{87}Rb/^{86}Sr$ .

**The aim** of the research is to identify the features of the genesis of groundwater and the interaction in the «water–rock» system from the standpoint of isotopic geochemistry.

**Methods.** The analysis of the complex of  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C_{DIC}$  of waters and dissolved inorganic carbon was carried out at the Center for Collective Use of the IGM SB RAS using the Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253. The  $^{87}Sr/^{86}Sr$  u  $^{87}Rb/^{86}Sr$  isotopic ratios were studied on an MI 1201T mass spectrometer in a two-tape mode with registration on one collector.

**Results.** The authors have studied the stable isotope composition ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C_{DIC}$ ) and isotopic ratios of  $^{87}Sr/^{86}Sr$  and  $^{87}Rb/^{86}Sr$  of the waters of the developed oil fields of the Novosibirsk region. The hydrogeological section shows the presence of two main genetic types of groundwater: ancient infiltrogenic and sedimentogenic. For most of the studied samples, the  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  indicates a combination of two determining factors: initial depletion of water in the light isotope  $^{16}O$  as a result of climatic impact during the period «before disposal» up to 4–5 ‰; further saturation of waters with the heavy isotope  $^{18}O$  during a long WRI, which led to additional 2–3 ‰ of heavier isotopic composition. The  $\delta^{13}C_{DIC}$  values for a number of samples suggested bacterial origin of dissolved inorganic carbon. There is a clear increase in the  $\delta^{13}C_{DIC}$  in waters which temperature exceeds 90 °C, to the values corresponding to the «normal» ones in thermal waters: from –8 up to +4 ‰ VPDB. The waters are characterized by low  $^{87}Sr/^{86}Sr$  ratios relative to ocean waters. A significant contribution of mantle sources of strontium is assumed, which manifests itself to different degrees for the waters of various deposits.

### Key words:

Groundwater,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ,  $\delta^{13}C$ , isotopic ratios of  $^{87}Sr/^{86}Sr$  u  $^{87}Rb/^{86}Sr$ , interaction in «water–rock» system, developed pool, oil field, Novosibirsk region, Western Siberia.

The research was conducted with the financial support from the Fundamental Research Program of the Russian Academy of Science, project no. 0331-2019-0025, the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-45-540006, and the Government of the Novosibirsk region.

### REFERENCES

1. Ferronskiy V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery* [Isotopy of the hydrosphere]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2009. 632 p.
2. Bidzhakov V.I., Danenberg Ye.Ye., Ivanov I.A., Tishchenko G.I. *Neftegazonosnost verkhney chasti paleozoya yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy plity* [Oil and gas content of the upper part of the Paleozoic in the southeast of the West Siberian plate]. *Neftegazonosnost Sibiri i Dalnego Vostoka* [Oil and gas content of Siberia and the Far East]. Novosibirsk, SB RAS, 1981. pp. 116–121.
3. Kontorovich A.E., Ivanov I.A., Koveshnikov A.Ye., Krasnov V.I., Perozio G.N. *Geologicheskiye usloviya neftegazonosnosti verkhney chasti paleozoyskogo razreza Zapadnoy Sibiri (na primere Mezhovskogo sredinnogo massiva)* [Geological conditions of oil and gas content of the upper part of the Paleozoic section of Western Siberia (on the example of the Mezhovskiy median massif)]. *Teoreticheskiye i regionalnyye problemy geologii nefii i gaza* [Theoretical and regional problems of oil and gas geology]. Novosibirsk, SB RAS, 1991. pp. 152–171.
4. Novikov D.A., Pavlova S.A., Kuznetsov Yu.D., Ryzhkova S.V., Chernikov A.A. Contemporary development state of reservoir Yu1, the Verkh-Tarskoe oilfield (south of Western Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1451 (1), 012008.
5. *Mestorozhdeniya (razrabatyvaemye)* [Deposits (developed)]. Available at: <https://www.novng.ru/production/deposits/> (accessed 10 August 2020).

6. Novikov D.A., Ryzhkova S.V., Dultsev F.F., Chernykh A.V. On the geothermal zoning of oil and gas deposits in the northwestern regions of the Novosibirsk region. *Oil and Gas Studies*, 2018, no. 5, pp. 69–76. In Rus.
7. Novikov D.A., Ryzhkova S.V., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Ses K.V., Efimtsev N.A., Shokhin A.E. Oil and gas hydrogeochemistry of pre-Jurassic complexes in the southern regions of the Ob-Irtysh interfluvium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 39–54. In Rus.
8. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Ryzhkova S.V. Hydrodynamic features of oil and gas deposits in the southern regions of the Ob-Irtysh interfluvium. *Georesources*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 85–94. In Rus.
9. Novikov D.A., Shokhin A.E., Chernikov A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Geochemistry of water-dissolved gases of oil and gas deposits in the southern regions of the Ob-Irtysh interfluvium. *Oil and Gas Studies*, 2019, no. 4 (136), pp. 70–81. In Rus.
10. Sadykova Ya.V., Fomin M.A., Ryzhkova S.V., Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Forecast of the oil and gas content of the Jurassic and Paleozoic sediments of the southern regions of the West Siberian basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 114–127. In Rus.
11. Boral S., Sen I.S., Ghosal D., Peucker-Ehrenbrink B., Hemingway J.D. Stable water isotope modeling reveals spatio-temporal variability of glacier meltwater contributions to Ganges River headwaters. *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 577, 123983.
12. Swetha T.V., Gopinath G., Resmi T.R. Isotope mass balance estimation of groundwater recharge in a hard rock tropical river basin in Kerala, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, vol. 11, 100422.
13. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil–vegetation–atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, vol. 35, pp. 565–570.
14. Cotovicz L.C. Jr., Knoppers B.A., Deirmendjian L., Abril G. Sources and sinks of dissolved inorganic carbon in an urban tropical coastal bay revealed by  $\delta^{13}\text{C}$ -DIC signals. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, vol. 220, pp. 185–195.
15. Shoedarto R.M., Tada Y., Kashiwaya K., Koike K. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction. *Geothermics*, 2020, vol. 86, 101797.
16. Stefánsson A., Arnórsson S., Sveinbjörnsdóttir A.E., Heinemaier J., Kristmannsdóttir H. Isotope ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) and chemical (B, Cl) Constraints on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 108, 104380.
17. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, vol. 390, 106708.
18. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
19. Andreo B., Linan C., Carrasco F., Jimenez de Cisneros C., Caballero F., Mudry J. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition ( $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$ ) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunqueira-Nieves karst aquifers (S Spain). *Applied Geochemistry*, 2004, vol. 19, pp. 561–574.
20. Shemelina O., Sanchaa A., Faguet A. Isotopic characteristics ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ ) of surface and groundwater as an additional tool for searching quality drinking water (Western part of Novosibirsk Region, Russia). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, 012019.
21. Bagheri R., Bagheri F., Karami G. H., Jafari H. Chemo-isotopes ( $^{18}\text{O}$  &  $^2\text{H}$ ) signatures and HYSPLIT model application: clues to the atmospheric moisture and air mass origins. *Atmospheric Environment*, 2019, vol. 215, 116892.
22. Chafouq D., Mandour A.El., Elgettafi M., Himi M., Choukri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2018, vol. 139, pp. 1–13.
23. Wu H., Wu J., Song F., Abuduwaili J., Saparov A.S., Chen X., Shen B. Spatial distribution and controlling factors of surface water stable isotope values ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$ ) across Kazakhstan, Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 678, pp. 53–61.
24. Nicholson K. *Geothermal fluids, chemistry and exploration techniques*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 1993. 223 p.
25. Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Karogodin Yu.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., Shurygin B.N. Paleogeography of the West Siberian sedimentary basin in the Cretaceous period. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 745–776. In Rus.
26. Xu W., Ruhl M., Jenkyns H.C., Hesselbo S.P., Riding J.B., Selby D., Naafs B.D.A., Weijers J.W.H., Pancost R.D., Tegelaar E.W., Idiz E.F. Carbon sequestration in an expanded lake system during the Toarcian oceanic anoxic event. *Nature Geoscience*, 2017, vol. 10, pp. 129–135.
27. Morin J., Jolivet M., Robin C., Heilbronn G., Barrier L., Bourquin S., Jia Y. Jurassic paleogeography of the Tian Shan: An evolution driven by far-field tectonics and climate. *Earth-Science Reviews*, 2018, vol. 187, pp. 286–313.
28. Hir G.L., Donnadiou Y., Godderis Y., Meyer-Berthaud B., Ramstein G., Blakey R.C. The climate change caused by the land plant invasion in the Devonian. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, vol. 310, pp. 203–212.
29. Huang C., Joachimski M.M., Gong Y. Did climate changes trigger the Late Devonian Kellwasser Crisis? Evidence from a high-resolution conodont  $\delta^{18}\text{O}$  record from South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, vol. 495, pp. 174–184.
30. Royer D.L., Berner R.A., Montañez I.P., Tabor N.J., Beerling D.J.  $\text{CO}_2$  as a primary driver of Phanerozoic climate. *Geological Society of America Today*, 2004, vol. 14, no. 3, pp. 4–10.
31. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 236, Iss. 1–2, pp. 419–429.
32. Liu Z., Dreybrodt W., Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric  $\text{CO}_2$  budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 99, no. 3–4, pp. 162–172.
33. Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczepak D., Jędrysek M.-O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Environmental Pollution Volume*, 2011, vol. 159, no. 1, pp. 294–301.
34. Deirmendjian L., Abril G. Carbon dioxide degassing at the groundwater-stream-atmosphere interface: isotopic equilibration and hydrological mass balance in a sandy watershed. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 558, pp. 129–143.
35. Pohlman J.W., Ruppel C., Hutchinson D.R., Downer R., Coffin R.B. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, vol. 25, pp. 942–951.
36. Lerouge C., Debure M., Henry B., Fernandez A.-M., Blessing M., Proust E., Made B., Robinet J.-C. Origin of dissolved gas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , alkanes) in pore waters of a clay formation in the critical zone (Tegulines Clay, France). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, 104573.
37. Cao M., Jiang Y., Chen Y., Fan J., He Q. Variations of soil  $\text{CO}_2$  concentration and  $p\text{CO}_2$  in a cave stream on different time scales in subtropical climatic regime. *Catena*, 2020, vol. 185, 104280.
38. Krakat N., Westphal A., Schmidt S., Scherer P. Anaerobic digestion of renewable biomass: thermophilic temperature governs methanogen population dynamics. *Applied and Environmental Microbiology*, 2020, vol. 76, Iss. 6, pp. 1842–1850.
39. Tiwari S.K., Rai S.K., Bartarya S.K., Gupta A.K., Negi M. Stable isotopes ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) and geochemical characteristics of geothermal springs of Ladakh and Himachal (India): Evidence for  $\text{CO}_2$  discharge in northwest Himalaya. *Geothermics*, 2016, vol. 64, pp. 314–330.
40. Tiwari S.K., Gupta A.K., Asthana A.K.L. Evaluating  $\text{CO}_2$  flux and recharge source in geothermal springs, Garhwal Himalaya, India: stable isotope systematics and geochemical proxies. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 14818–14835.
41. Friedman I. Some investigations of the deposition of travertine from Hot Springs – I. The isotopic chemistry of a travertine-depositing spring. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1970, vol. 34, Iss. 12, pp. 1303–1315.



42. Blasco M., Auqué L.F., Gimeno M.J., Asta M.P., Mandado J. Stable isotope characterisation of recent aragonite travertine deposits associated with the Fitero thermal waters (Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 2020, vol. 109, Iss. 3, pp. 877–892.
43. Alçiçek H., Bülbül A., Yavuzer İ., Cihat Alçiçek M. Origin and evolution of the thermal waters from the Pamukkale Geothermal Field (Denizli Basin, SW Anatolia, Turkey): Insights from hydrogeochemistry and geothermometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2019, vol. 372, pp. 48–70.
44. Kele S., Demény A., Siklósy Z., Németh T., Tóth M., Kovács M.B. Chemical and stable isotope composition of recent hot-water travertines and associated thermal waters, from Egerszalók, Hungary: depositional facies and non-equilibrium fractionation. *Sedimentary Geology*, 2008, vol. 211, Iss. 3–4, pp. 53–72.
45. Marty B., Jambon A.  $C^3He$  in volatile fluxes from the solid Earth: implications for carbon geodynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, vol. 83, Issues 1–4, pp. 16–26.
46. Trull T., Nadeau S., Pineau F., Polve M., Javoy M. C-He systematics in hotspot xenoliths: implications for mantle carbon contents and carbon recycling. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, vol. 118, Iss. 1–4, pp. 43–64.
47. Newell D.L., Jessup M.J., Cottle J.M., Hilton D.R., Sharp Z.D., Fischer T.P. Aqueous and isotope geochemistry of mineral springs along the southern margin of the Tibetan plateau: Implications for fluid sources and regional degassing of CO<sub>2</sub>. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, vol. 9, Iss. 8, Q08014.
48. Evans M.J., Derry L.A., France-Lanord C. Degassing of metamorphic carbon dioxide from the Nepal Himalaya. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, vol. 9, Iss. 4, Q04021.
49. Dominova I.N., Kublanov I.V., Podosokorskaya O.A., Derbikova K.S., Patrushev M.V., Toshchakov S.V. Complete genomic sequence of «*Thermophilum adornatus*» strain 1910bT, a hyperthermophilic anaerobic organotrophic crenarchaeon. *Genome Announcements*, 2013, vol. 1, Iss. 5, e00726-13.
50. Kochetkova T.V., Kublanov I.V., Toshchakov S.V., Osburn M.R., Novikov A.A., Bonch-Osmolovskaya E.A., Perevalova A.A. *Thermogladius calderae* gen. nov., sp. nov., an anaerobic, hyperthermophilic crenarchaeote from a Kamchatka hot spring. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2016, vol. 66, Iss. 3, pp. 1407–1412.
51. Podosokorskaya O.A., Kadnikov V.V., Gavrilov S.N., Mardanov A.V., Merkel A.Y., Karnachuk O.V., Ravin N.V., Bonch-Osmolovskaya E.A., Kublanov I.V. Characterization of *Meliobacter roseus* gen. nov., sp. nov., a novel facultatively anaerobic thermophilic cellulolytic bacterium from the class Ignavibacteria, and a proposal of a novel bacterial phylum Ignavibacteriae. *Environmental Microbiology*, 2013, vol. 15, Iss. 6, pp. 1759–1771.
52. Bonch-Osmolovskaya E., Elcheninov A., Zayulina K., Kublanov I. New thermophilic prokaryotes with hydrolytic activities. *Microbiology Australia*, 2018, vol. 39, Iss. 3, pp. 122–125.
53. Schmidt G., Najem S.A., Isenbeck-Schröter M., Freundt F., Kraml M., Eichstadter R., Aeschbach W.  $87Sr/86Sr$  ratios in shallow and deep aquifers and thermal water from the eastern boundary fault of the Northern Upper Rhine Graben at the Heidelberg Basin, Germany. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, vol. 17, pp. 108–111.
54. Petelet-Giraud E., Négrel P., Casanova J. Tracing Mixings and Water-Rock Interactions in the Loire River Basin (France):  $\delta^{18}O$ - $\delta^2H$  and  $87Sr/86Sr$ . *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, vol. 17, pp. 794–797.
55. Hans U., Kleine T., Bourdon B. Rb-Sr chronology of volatile depletion in differentiated protoplanets: BABI, ADOR and ALL revisited. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, vol. 374, pp. 204–214.
56. McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. *The geologic time scale. Chapter 7 – Strontium isotope stratigraphy*. Amsterdam, Elsevier, 2012. pp. 127–144.
57. Alexeev S., Alexeeva L., Shouakar-Stash O. Strontium isotopic ratio in brines from the north-east of the Angara-Lenskiy artesian basin. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, 12001.
58. Weihua W., Mingzhao S., Xiang J., Shuyi Q. Sr isotopic characteristics and fractionation during weathering of a small granitic watershed system in the Jihua Mountains (eastern China). *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 568, pp. 135–146.
59. Korte C., Ullmann C.V. Permian strontium isotope stratigraphy. *Geological Society London Special Publications*, 2016, vol. 450, Iss. 1, pp. 105–118.
60. Banner J.L. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 2004, vol. 65, Iss. 3–4, pp. 141–194.
61. Armstrong S.C., Sturchio N.C., Hendry M.J. Strontium isotopic evidence on the chemical evolution of pore waters in the Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Applied Geochemistry*, 1998, vol. 13, pp. 463–475.
62. Luis A.T., Duraes N., Ferreira da Silva E., Ribeiro S., Silva A.J.F., Patinha C., Almeida S.F.P., Azevedo M.R. Tracking multiple Sr sources through variations in  $87Sr/86Sr$  ratios of surface waters from the Aljustrel massive sulphide mining area: geological versus anthropogenic inputs. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 102, pp. 108–120.
63. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 44, no. 5, pp. 780–786.
64. Novikov D.A. Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 193, 012049.

Received: 30 August 2020.

#### Information about the authors

**Dmitry A. Novikov**, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

**Aleksandr N. Pyrayev**, Cand. Sc., researcher, Institute of Geology and Mineralogy of SB of RAS; assistant, Novosibirsk State University.

**Anatoliy V. Chernykh**, research associate, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Fedor F. Dultsev**, research associate, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Svetlana V. Ryzhkova**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

УДК 339.13:669.28

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МОЛИБДЕНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 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 необходимостью изучения проблем молибденовой промышленности России.

**Цель:** изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) молибденовых продуктов (молибденитовых концентратов и ферромолибдена), их цен (мировых, российского импорта и экспорта) и долей участия российским молибденовыми продуктами в мировом хозяйстве; выработка рекомендаций по оптимизации товарооборота молибденовой продукции.

**Методы:** статистический, графический, логический.

В результате анализа динамики товарных потоков молибденовых продуктов и цен на них, результатов деятельности добывающих и перерабатывающих предприятий установлены значительные изменения состояния российской молибденовой промышленности. До 2005 г. молибденовая отрасль России находилась в кризисном состоянии, экспортируя значительную часть молибденитового концентрата и импортируя большую часть потребляемого ферромолибдена. В результате резкого увеличения в 2004–2008 гг. мировых цен на практически все молибденовые продукты стали привлекательны инвестиции в проекты молибденовой отрасли. Построены новые ферромолибденовые заводы (Сорский и Жирекенский), началась подготовка проектов добычи молибдена на новых месторождениях (молибденовые Агаскырское и Бурдаинское, Ак-Сугское медно-порфировое, Южно-Шамейское вольфрам-молибденовое), появился значительный экспортный поток ферромолибдена. Спад мировых цен на молибденовые продукты начиная с 2009 г. привел к откату активности в молибденовой отрасли России, но в целом ее состояние не критично. Добыча молибденового сырья перестала быть экспортноориентированной, а с появлением дефицита национального потребления появилась и формальная импортная зависимость (20–36 % от потребления). Возникает необходимость наращивания национального производства (добычи) молибденовых руд и концентратов. Сформировался принципиально новый технологический поток сквозной импорто-экспортной торговли, когда импортируется молибденитовый концентрат, а произведенный из него ферромолибден направляется на экспорт. Для улучшения ситуации в российской молибденовой промышленности рекомендуется: ускорение восстановления остановленных добывающих и перерабатывающих предприятий; вовлечение в эксплуатацию новых молибденовых месторождений; использование новых технологий обогащения и переработки молибденового сырья; организация производства новых товарных продуктов – оксидов молибдена и молибдатов.

**Ключевые слова:**

Молибденовая промышленность России, молибденитовые концентраты, ферромолибден, товарные потоки, импортозависимость.

### Введение

Молибден – металл, используемый для производства легированных конструкционных и нержавеющей сталей различных марок и изделий из металлического молибдена (80 % потребления), в химической промышленности для производства катализаторов (10 %), а также в пигментах красителей, компонентов, в составе микроудобрений [1]. Природный сульфид молибдена (молибденит) используется также в качестве твердой антифрикционной смазки.

В 80-е гг. XX в. производство молибденовой продукции в СССР достигало 16 тыс. т (в пересчете на 100 % Мо), что составляло 11 % мирового потребления (второе место в мире после США). В результате распада страны за пределами России оказались крупные добывающие молибденовое сырье производства (Зангезурский и Агаракский медно-молибденовый комбинат в Армении, Балхашский горно-металлургический комбинат и Целинный горно-химический комбинат в Казахстане, Алмалыкский ГМК в Узбекистане), про-

дукция которых была переориентирована на собственные нужды и экспорт в другие страны [2]. В 90-е гг. XX в. поток молибденового концентрата российско-монгольского ГОКа «Эрдэнэт» в Монголии был переориентирован с России на Китай, а в 2007 г. российская часть его активов была продана [3]. Доля добычи молибденового сырья России в мировом его производстве сократилась до 2–3 %. Крупнейший производитель ферромолибдена – Челябинский электрометаллургический комбинат – прекратил его выпуск, и в конце 1990-х гг. производство продукции из молибдена сократилось до первых сотен тонн в год, а добываемые в России молибденовые концентраты (7–11 тыс. т/год) преимущественно отправлялись на экспорт. В 2000 г. остановлена работа Тырнаузского ГОКа на одноименном месторождении в Кабардино-Балкарской Республике, в 2009 г. – Калтугинского рудника в Республике Алтай, в 2013 г. – Жирекенского ГОКа в Забайкальском крае. Ситуация в молибденовой промышленности России стала весьма сложной, особенно в условиях недо-

статочности мощностей ферросплавных предприятий, производящих ферромolibден. Внутренний рынок сбыта молибденовой продукции весьма ограничен, а на мировом его рынке основными игроками являются Китай, Чили и США [4–7]. Молибденовые продукты во многих странах относятся к критическим материалам, в том числе в США [8], Европейском Союзе [9] и Индии. В 2004–2008 гг. произошел всплеск мировых цен на молибденовую продукцию, что привело к оживлению в российской молибденовой промышленности, но при последующем падении цен опять наметился спад активности в отрасли. Требуется анализ состояния национальной минерально-сырьевой базы молибдена, тенденций спроса и предложения молибденового сырья и продукции на российском и мировом рынках.

#### Методы исследования

С целью изучения российского рынка молибденовых продуктов были обработаны данные по движению товарных потоков молибденового концентрата и ферромolibдена за 1996–2019 гг., динамика изменений цен их российского импорта и экспорта, а также среднемировых цен. Источники информации: Государственные доклады Федерального агентства недропользования Российской Федерации [10], базы данных Федеральной службы государственной статистики [11] и Федеральной таможенной службы [12] России, статистические данные ООН [13], обзоры информационных центров [14, 15].

Объемы товарных потоков молибденовых продуктов учтены в метрических тоннах, а цены – в долла-

рах США за килограмм товара. Обобщенные суммарные объемы молибденовых продуктов приведены в пересчете на 100 % Мо. Доли импорта определялись по отношению импортных объемов к объемам национального потребления и реализации (потребления + экспорта), доли экспорта – по отношению экспортных объемов к объемам национального производства. Среднемировые цены молибденовых продуктов рассчитаны по суммарным объемам и стоимости мирового экспорта. Темпы годовых изменений во времени абсолютных показателей (объемы, стоимость) определяются в виде сложных процентов, относительных показателей (цены, доли) – в виде простых процентов. Имеются лагуны данных по отдельным периодам, не позволяющие рассчитывать производные величины (цены, доли), – они исключались из вычислений и построений графиков.

#### Состояние минерально-сырьевой базы и добывающих предприятий молибденовой отрасли России

Исходным сырьем для производства молибдена являются молибденитовые концентраты, производящиеся на собственно молибденовых, а также комплексных (медно-молибденовых, молибден-вольфрамовых и др.) месторождениях [10, 16–19]. Молибденит является высокотехнологичным легкофлотуемым материалом и поэтому извлекается из собственно молибденовых и комплексных руд при его содержании от 0,005 % и выше.

На рис. 1 показана география молибденоносных провинций, месторождений молибдена и добывающих предприятий [10].



**Рис. 1.** Молибденоносные провинции, месторождения молибдена, российские предприятия, добывающие и производящие молибденовую продукцию: 1 – молибденоносные провинции (I – Карело-Кольская, II – Северо-Кавказская, III – Уральская, IV – Алтае-Саянская, V – Западно-Забайкальская, VI – Восточно-Забайкальская, VII – Чукотская); 2 – месторождения молибдена; 3, 4 – предприятия, добывающие молибденовое сырье (3 – действующие, 4 – законсервированные); 5 – заводы перерабатывающие молибденовое сырье

**Fig. 1.** Molybdenum-bearing provinces, molybdenum deposits, Russian mine companies and plants manufacturing molybdenum products: 1 – molybdenum-bearing provinces (I – Karelo-Kola, II – North Caucasus, III – Ural, IV – Altai-Sayan, V – West Trans-Baikal, VI – East Trans-Baikal, VII – Chukotka); 2 – molybdenum deposits; 3, 4 – enterprises producing molybdenum raw materials (3 – operating, 4 – preserved); 5 – plants processing molybdenum raw materials

По состоянию на 01.01.2019 г. балансовые запасы категорий А+В+С<sub>1</sub>+С<sub>2</sub> молибдена в России составляли 2,2 млн т 100 % Мо, а прогнозные ресурсы категорий Р<sub>1</sub>+Р<sub>2</sub>+Р<sub>3</sub> – 3,5 млн т 100 % Мо [10]. Отличие российской сырьевой базы молибдена от мировой, где преобладают комплексные месторождения медно-порфиrowого типа, заключается в доминировании собственно молибденовых месторождений (балансовые запасы категорий А+В+С<sub>1</sub> – 0,95 млн т 100 % Мо, категории С<sub>2</sub> – 0,45 млн т 100 % Мо), с подчиненным значением комплексных молибден-вольфрамовых, медно-порфиrowых и молибден-урановых месторождений. Себестоимость производства молибденитового концентрата из собственно молибденовых месторождений существенно выше, нежели стоимость его извлечения из комплексных руд, что снижает конкурентоспособность российских предприятий.

Тем не менее при достаточном экономическом обосновании возможна разработка новых месторождений молибдена в пределах доступной транспортной инфраструктуры [20], а также восстановление остановленных в кризисные годы добывающих производств [21]. Поэтому наибольший интерес представляют месторождения Уральской, Алтае-Саянской, Западно-Байкальской, Восточно-Байкальской, Уральской, Северо-Кавказской и Карело-Кольской провинций [10, 16–18].

Добычу молибденовых руд и концентратов в настоящее время в России осуществляют ООО «Сорский ГОК» на Сорском штокерковом молибденовом месторождении в Республике Хакасия и АО «Михеевский ГОК» на Михеевском медно-порфиrowом месторождении в Челябинской области (таблица). В 2012 г. по экономическим причинам остановилась добыча на Жирекенском штокерковом собственно молибденовом месторождении (АО «Жирекенский ГОК», Забайкальский край).

На гидрометаллургическом заводе Приаргунского производственного горно-химического объединения при переработке руд Стрельцовского уранового месторождения (Забайкальский край) в качестве попутного продукта в небольших объемах выпускается парамолибдат аммония.

Подъем мировых цен на молибденовое сырье в 2004–2008 гг. (вслед за еще более бурным ростом цен на ферромолибден) стимулировал повышение инвестиционного интереса к российским проектам разведки (Коклановский, Песчанка) и добычи (Тырнаузский, Жарчихинский, Арысканский, Бугдаинский, Ак-Сугский, Южно-Шамейский) молибденового сырья, но в последующие годы (после падения цен в 2009 г.) реализация многих проектов (Жарчихинский, Арысканский, Бугдаинский) была приостановлена.

На рис. 2, а показана динамика балансов товарных потоков молибденовых руд и концентратов в России в 1996–2019 гг.

*Производство* (добыча) российских молибденовых руд и концентратов в 1996–2006 гг. составляло 6–8 тыс. т/год. На фоне роста потребления после расширения ферромолибденовых производств российское предложение молибденитовых концентратов увеличилось в 2009–2012 гг. до 10–11 тыс. т/год. В дальнейшем, на фоне падения мировых цен на молибденовое сырье, российское про-

изводство молибденитового концентрата стало снижаться, вплоть до 5,5 тыс. т в 2019 г.

В период 1996–2004 гг. значительная часть добытого молибденового сырья отправлялось на *экспорт* (4–10 тыс. т/год, или 70–100 %), преимущественно в Бельгию и Нидерланды (рис. 2, е). Ввод в эксплуатацию новых российских производств ферромолибдена (Сорский и Жирекенский) и активизация работы старых ферросплавных заводов привели к переориентации поставок молибденового концентрата на национальное потребление, и доля экспорта, начиная с 2007 г., упала до исчезающе малой величины (0–2,8 % от производства).

В *импортном* потоке молибденового сырья также происходили изменения. Если в 1996–2004 гг. он представлял собой ориентированную на экспорт транзитную торговлю молибденитовым концентратом (1–2,3 тыс. т/год), то в 2004–2008 гг. ввиду резкого роста цен на молибденовое сырье (концентрат и ферромолибден) импорт сократился до 0,1–0,6 тыс. т/год. После падения цен в 2009 г. сформировался принципиально новый технологический поток импорта молибденового сырья (2,3–3,2 тыс. т/год, или 20–36 % от потребления) для производства ферромолибдена с последующим его экспортом [22].

По источникам импорта молибденитовый концентрат в 1996–2004 гг. поступал из Армении и Казахстана (для последующего транзитного экспорта), а с 2009 г. – из Чили, Нидерландов, Бельгии и США (рис. 2, d). В 2014 г. имел место разовый импортный транш 4,1 тыс. т молибденового сырья из Казахстана.

Национальное *потребление* молибденовых руд в 1996–2004 гг. составляло 1–2 тыс. т/год, но после создания новых ферросплавных производств выросло и начиная с 2007 г. остается до настоящего времени на уровне 8–11 тыс. т/год. Реализация молибденового сырья (внутренне потребление + экспорт) за весь период с 1996 по 2019 гг. находилась примерно на одном уровне – 8–11 тыс. т/год, что свидетельствует о стабильности его национального потребления.

Динамика мировых цен на молибденовые концентраты (рис. 2, b) имеет следующие временные тренды:

- относительно стабильный уровень цен 3,5–7,5 \$ США/кг в период с 1996 по 2003 гг.;
- подъем цены начиная с 2004 г. до 36,0 \$ США/кг в 2007 г.;
- падение цен до 7,3 \$ США/кг в 2016 г. с локальным минимумом в 2009 г.;
- подъем цены до 13,3–13,7 \$ США/кг в 2018–2019 гг.

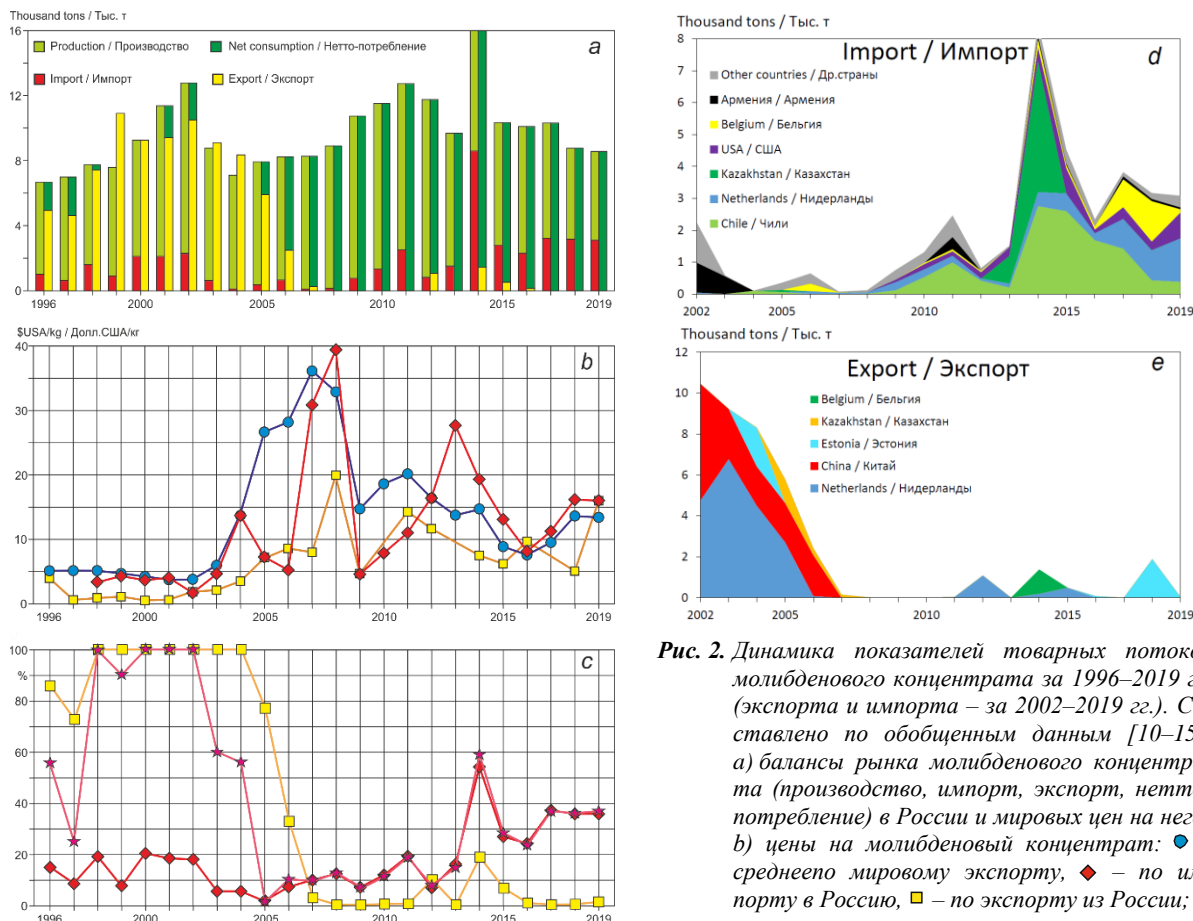
Подъем мировых цен на молибденовое сырье в 2004–2008 гг. произошел в результате бурного роста производства стали в Китае [6, 7, 23], а спад цен в 2009–2016 гг. – в результате запуска множества проектов разработки месторождений молибдена по всему миру [24].

Цены импорта молибденитового концентрата до 2004 г. были на уровне мировых цен, а в 2013–2019 гг. – на 15–30 % выше мировых. Цены импорта молибденитового концентрата в 2004–2011 гг. достаточно случайны ввиду малых его объемов. Цены же российского экспорта молибденитового сырья в течении всего периода 1996–2019 гг. на 5–10 % ниже мировых цен.

**Таблица.** Основные месторождения молибдена. Составлено по данным [10]

**Table.** The main deposits of molybdenum. Compiled from the data from [10]

Месторождение, его геолого-промышленный тип Field, its geological and industrial type	Запасы, тыс. т Reserves, thousand tons [A+B+C <sub>1</sub> ] + C <sub>2</sub>	Среднее содержание, % Average content, %	Недропользователь Subsoil developer	Регион, инфраструктура Region, infrastructure	Стадия работ Action stage
Сорское, молибденовое Sorskoe, molybdenum	94+0,2	0,061	ООО «Сорский ГОК» (АО УК «Союзметаллресурс») Sorskii LLC (MC Souzmetallresource JSC)	Республика Хакасия, район освоен Republic of Khakassia, infrastructure is developed	Добычные работы Mining operations
Михеевское, медно-порфировое Mikheevskoe, copper porphyry	Mo 0+12 Cu 1279+ 861	Mo 0,002 Cu 0,37	АО «Михеевский ГОК» (АО «Русская медная компания») Miheevskiy JSC (Russkaya mednaya kompaniya JSC)	Челябинская область, район освоен Chelyabinsk Region, infrastructure is developed	Добычные работы Mining operations
Тырнаузское, вольфрам-молибденовое Tyrnauzskoe, tungsten-molybdenum	Mo 36+0 W 202+8	Mo 0,051 W 0,44	ООО «Эльбрусский ГПК» (ГК «Ростех») Elbrusskiy GRK LLC (State Corporation Rostec)	Кабардино-Балкарская Республика, район освоен Kabardino-Balkarian Republic, infrastructure is developed	Восстановление предприятия, проектирование разработки Renewal mining complex, project of mining
Жирекенское, молибденовое Zhirekenskoe, molybdenum	62+0	0,105	ОАО «Жарчихинский ГОК (АО УК «Союзметаллресурс») Sorskii LLC (MC Souzmetallresource JSC)	Забайкальский край, район освоен Trans-Baikal Territory, infrastructure is developed	Восстановление предприятия Renewal mining complex
Арысканское, молибденовое Aryskanskoe, molybdenum	155+0	0,05	ООО «Сорский ГОК» (АО УК «Союзметаллресурс») Sorskii LLC (MC Souzmetallresource JSC)	Республика Хакасия, район освоен Republic of Khakassia infrastructure is developed	Проектирование разработки Project of mining
Южно-Шамейское, вольфрам-молибденовое Yuzhno-Shameyskoe, tungsten-molybdenum	Mo 42+22 W 0+14	Mo 0,082 W 0,04	ООО «ГПК «Уральское золото» (АО УГМК) Uralskoe zoloto LLC (UMMC JSC)	Свердловская область, район освоен Sverdlovsk Region, infrastructure is developed	Проектирование разработки Project of mining
Ак-Сугское, медно-порфировое Ak-Sugskoe, copper porphyry	Mo 71+7 Cu 3121+ 512	Mo 0,015 Cu 0,67	ООО «Гелевская ГРК» (ГК «Онэксим») Gelevskaya LLC (ONEXIM Group)	Республика Тыва, район не освоен Republic of Tuva, infrastructure is not developed	Проектирование разработки Project of mining
Бурдаинское, молибденовое Burdainskoe, molybdenum	347+252	0,08	ООО «Бурдаинский рудник» (ПАО «ГМК "Норильский никель"») Bugdainskiy rudnik LLC (M&MC Norilsk nikel PJSC)	Забайкальский край, район не освоен Trans-Baikal Territory, infrastructure is not developed	Проектирование Project of mining
Коклановское, вольфрам-молибденовое Koklanovskoe, tungsten-molybdenum	Mo 24+ 131 W 12+ 130	Mo 0,082 W 0,04	АО «Коклановское» Koklanovskoe JSC	Курганская область, район освоен Kurgan Region, territory is developed	Геолого-разведочные работы Geological exploration
Песчанка, медно-порфировое Peschanka, copper porphyry	Mo 131+ 40 Cu 4825 + 1575	Mo 0,023 Cu 0,53	ООО «ГДК «Баимская» (KAZ Minerals PLC) Baimskaya LLC (KAZ Minerals PLC)	Чукотский АО, район не освоен Chukotka Autonomous Area, infrastructure is not developed	Геолого-разведочные работы Geological exploration
Ореkitканское, молибденовое Orekitkansko, molybdenum	247+114	0,099	Нераспределенный фонд недр Undistributed subsoil fund	Республика Бурятия, район не освоен Republic of Buryatia, infrastructure is not developed	Работы не ведутся Work is not underway
Жарчихинское, молибденовое Zharchikhinskoe, molybdenum	79+2	0,083	Нераспределенный фонд недр Undistributed subsoil fund	Республика Бурятия, район освоен Republic of Buryatia, infrastructure is developed	Работы не ведутся Work is not underway
Лобаш, молибденовое Lobash, molybdenum	54+71	0,069	Нераспределенный фонд недр Undistributed subsoil fund	Республика Карелия, район не освоен Republic of Karelia, infrastructure is not developed	Работы не ведутся Work is not underway



**Рис. 2.** Динамика показателей товарных потоков молибденового концентрата за 1996–2019 гг. (экспорта и импорта – за 2002–2019 гг.). Составлено по обобщенным данным [10–15]. а) балансы рынка молибденового концентрата (производство, импорт, экспорт, нетто-потребление) в России и мировые цены на него; б) цены на молибденовый концентрат: ● – среднеепо мировому экспорту, ◆ – по импорту в Россию, □ – по экспорту из России; в) доли объемов импорта молибденового концентрата от потребления (◆) и реализации (★), доли объемов экспорта от производства (□); д) объемы импорта молибденового концентрата по странами-поставщикам; е) объемы экспорта молибденового концентрата по странами-покупателям

**Fig. 2.** Dynamics of indicators commodity flows of molybdenum concentrate for 1996–2019 (exports and imports – for 2002–2019). Compiled from generalized data [10–15]. a) balances of the molybdenum concentrate market (production, import, export, net consumption) in Russia and world prices for it; b) prices for molybdenum concentrate: ● – average for world exports, ◆ – for imports to Russia, □ – for exports from Russia; c) share of imports of molybdenum concentrate from consumption (◆) and sales (★), the share exports volumes from production (□); d) volume of imports of molybdenum concentrate by supplier countries; e) volume of molybdenum concentrate exports by consumer countries

По динамике долей импорта молибденовые концентраты в период 1996–2005 гг. были импортозависимыми по отношению к реализации и независимыми по импорту от потребления. В период 2005–2013 гг. они импортонезависимы и по потреблению, и по реализации, но начиная с 2014 г. молибденовые руды и концентраты в рамках технологической цепочки их переработки стали импортозависимыми (рис. 2, с).

По динамике долей российского экспорта молибденовые концентраты в период 1996–2005 гг. были экспортноориентированными, но в дальнейшем молибденовое сырье в России стало предметом только национального потребления (рис. 2, с).

#### Состояние перерабатывающих предприятий молибденовой отрасли России

До 1995 г. крупнейшим потребителем молибденового сырья и производителем ферромолибдена был Челябинский электрометаллургический комбинат, но он полностью прекратил его выпуск после сокраще-

ния собственного производства броневых молибденовых сталей [1]. Производство ферромолибдена на других ферросплавных заводах в конце 1990-х гг. было незначительно, и появился его импорт для выпуска сортамента жаропрочных и нержавеющей сталей [25].

Бурный рост металлургии Китая в 2004–2008 гг. привел к росту мировых цен на ферросплавы, и особенно на ферромолибден. В результате этого действующие ферросплавные заводы России возобновили производство ферромолибдена, созданы новые специализированные ферромолибденовые заводы – Сорский (2005 г.) и Жирекенский (2006 г.) [26, 27]. Но резкий спад мировых цен на молибденовое сырье начиная с 2009 г. (как следствие мирового финансового кризиса) привел к стагнации молибденовой отрасли России. В 2012 г. остановлена добыча на Жирекенском ГОКе и производство ферромолибдена на Жирекенском заводе. В 2016 г. обанкротился второй в России по объемам выпуска ферромолибдена Камышинский литейно-ферросплавный завод, но на базе

остатков его активов в 2017 г. создано новое предприятие – ООО «Нижеволжский ферросплавный завод».

В настоящее время производство ферромолибдена в России осуществляют: ООО «Сорский ферромолибденовый завод» (Республика Хакассия), ООО «Нижеволжский ферросплавный завод» (Волгоградская область), ООО «Молирен» (Московская область), ПАО «Ключевской завод ферросплавов» (Свердловская область), ООО «Рязанский завод ферросплавов и лигатур» (г. Рязань) (рис. 1). Лидируют по объемам производства ферромолибдена Сорский ФМЗ (55–75 % российского выпуска), Нижеволжский ФСЗ (15–30 %) и Молирен (до 8 %). Молибден металлический в виде порошков, прутков и проволоки выпускает завод порошковой металлургии (АО «Полема», г. Тула).

На рис. 3, а показана динамика товарных потоков рынка ферромолибдена в России.

Производство российского ферромолибдена в 1996–2005 гг. было крайне неравномерно – от 0,05 до 1,5 тыс. т/год. После расширения ферромолибденовых производств российское предложение выросло к 2007 г. до 7 тыс. т, достигнув максимума – 9,1 тыс. т – в 2012 г. На фоне падения мировых цен на ферромолибден его российское производство стало снижаться, вплоть до 4,6 тыс. т в 2019 г.

Российское потребление ферромолибдена в 1996–2005 гг. перекрывалось в основном по импорту – от 0,3 до 3,7 тыс. т/год, в основном из Китая (рис. 3, d). После ввода новых ферромолибденовых производств импорт ферромолибденовой продукции резко сократился и составляет за весь период вплоть до 2019 г. не более 0,35 тыс. т/год (до 5 % от потребления). Следует отметить, что с 2015 г. главным поставщиком импортного ферромолибдена стала Грузия (рис. 3, d).

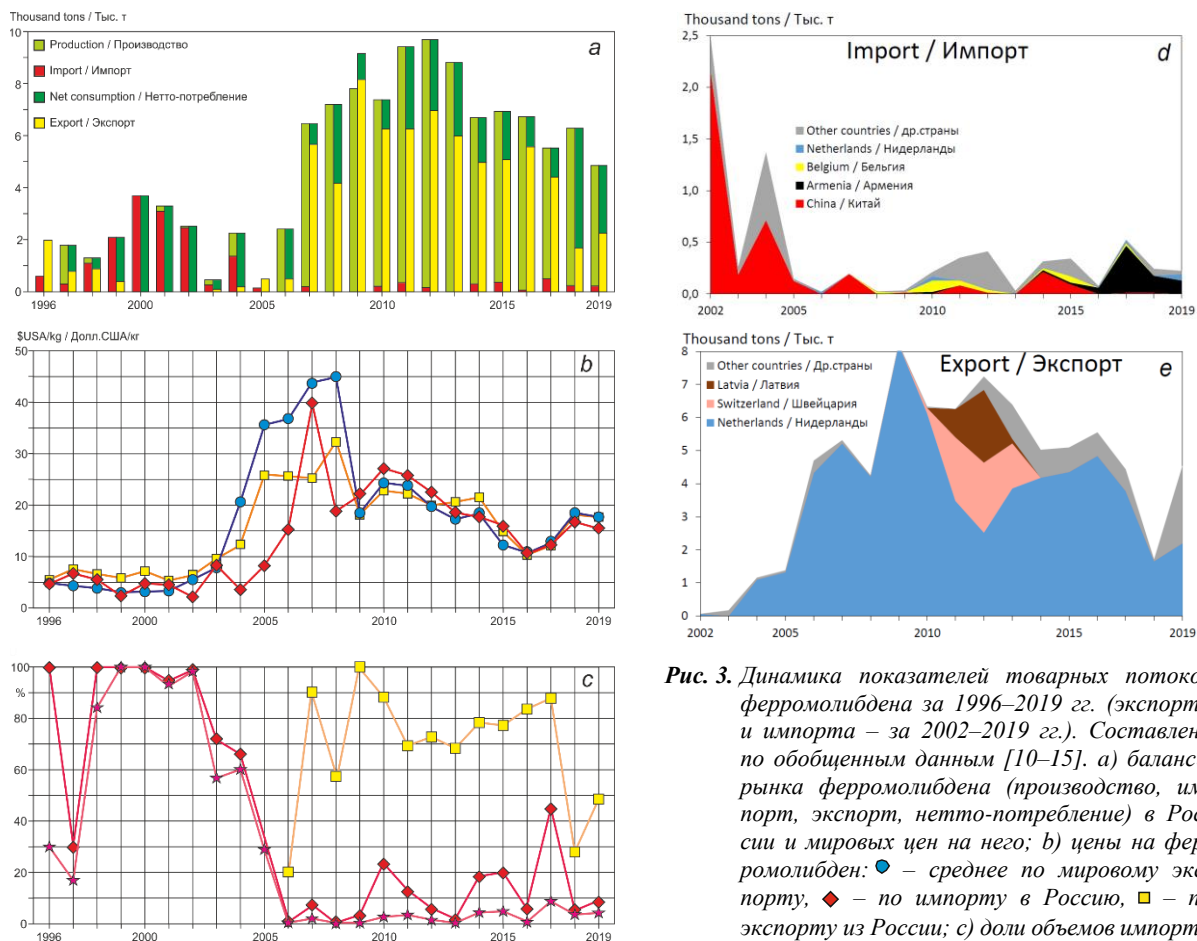


Рис. 3. Динамика показателей товарных потоков ферромолибдена за 1996–2019 гг. (экспорта и импорта – за 2002–2019 гг.). Составлено по обобщенным данным [10–15]. а) балансы рынка ферромолибдена (производство, импорт, экспорт, нетто-потребление) в России и мировых цен на него; б) цены на ферромолибден: ● – среднее по мировому экспорту, ◆ – по импорту в Россию, □ – по экспорту из России; в) доли объемов импорта

ферромолибдена от потребления (◆) и реализации (★), доли объемов экспорта от производства (□); д) объемы импорта ферромолибдена по странами-поставщикам; е) объемы экспорта ферромолибдена по странами-покупателям

Fig. 3. Dynamics of indicators commodity flows of ferromolybdenum for 1996–2019 (export and import for 2002–2019). Compiled from generalized data [10–15]. a) balances of the ferromolybdenum market (production, import, export and net consumption) in Russia and world prices; b) prices for ferromolybdenum (● – average world export, ◆ – import to Russia, □ – export from Russia); c) share of imports of ferromolybdenum from consumption (◆) and from implementation (★), share of export volumes from production (□); d) volume of imports of ferromolybdenum by countries-suppliers; e) volume of exports of ferromolybdenum by countries-consumer

Реальное потребление ферромолибдена в российской металлургии составляет 2–3 тыс. т/год и полностью обеспечивается имеющимися мощностями ферросплавного производства.

До 2006 г. экспорт ферромолибдена был незначителен – до 0,5 тыс. т/год, представляя собой разовые транзакции, зачастую как часть транзитных и встречных импортно-экспортных перевозок. Но после развития российского ферромолибденового производства наметился его избыток, что привело к появлению значительного экспортного потока ферромолибдена, достигшего максимума в 2009 г. – 8,2 тыс. т. На фоне снижения мировых цен на ферромолибден начиная с 2010 г. происходит снижение объемов его экспорта – до 1,7 тыс. т/год. Импортёрами же являются не страны-потребители ферромолибдена, а страны транзита материалов – Нидерланды, Швейцария и Латвия (рис. 3, е).

Динамика цен на ферромолибден в принципе конформна динамике цен на молибденовый концентрат и включает (рис. 3, б):

- стабильный уровень цен 3,1–7,6 \$ США/кг в период 1996–2003 гг.;
- подъем цены начиная с 2004 г. до 45,0 \$ США/кг в 2008 г.;
- падение цен до 10,6 \$ США/кг в 2016 г. с локальным минимумом в 2009 г.;
- подъем цены до 17,0 \$ США/кг в 2018 г.

Цены российского импорта ферромолибдена до 2003 г. были в принципе на уровне мировых цен, в дальнейшем же партии импорта были небольшими и отклонения импортных цен от мировых достаточно случайны.

Цены российского экспорта ферромолибдена в 1996–2003 гг. были выше мировых, но, учитывая малые объемы продаж, выгода этих операций неочевидна, в условиях же высоких мировых цен в 2004–2008 гг. (на подъеме роста российского производства ферромолибдена) были на 27–42 % ниже, а в дальнейшем (на спаде производства) находились примерно на уровне мировых цен. Именно дисконтная скидка цен на российский ферромолибден в 2004–2008 гг. и позволила создать экспортный поток и нарастить его долю в мировой торговле до 13 %.

Исходя из динамики долей импорта в 1996–2019 гг. ферромолибден начиная с 2006 г. перешел из категории импортозависимого товара в импортонезависимый продукт, а с 2007 г. стал еще и экспортноориентированным (рис. 3, с).

#### **Российские молибденовые продукты в мировом хозяйстве**

*Мировое производство и потребление.* Динамика доли российского предложения молибденового концентрата в объемах его мирового производства показана на рис. 4, а. Имеет место уменьшение доли его российского производства, остающегося примерно на одном уровне – 8–11 тыс. т/год – на фоне роста добывающих мощностей других стран (Китая, Чили, США, Перу). В результате доля производства молибденовых руд и концентратов в России снизилась с 2,3 % в

1996 г. до 0,9 % в 2019 г. В динамике же долей российского потребления молибденового сырья наблюдается рост с 0,2–1,0 % в 1996–2005 гг. (период стагнации ферромолибденового производства) до 1,5–2,4 % в последующий период (после строительства новых ферромолибденовых заводов). Тем не менее к 2019 г. имеется слабый тренд падения доли российского потребления молибденитового концентрата, обусловленного ростом мирового производства ферромолибдена. В сравнении динамики долей российской добычи и потребления молибденового сырья наблюдается превышение потребления над предложением начиная с 2007 г., причем с увеличением разрыва к 2019 г. до 0,6 % абс. (40 % отн.). Имеется стимул для увеличения национальной добычи молибденового сырья.

Динамика долей российского производства ферромолибдена (рис. 4, с) отражает периоды его стагнации (1996–2005 гг.), бурного развития (2006–2008 гг.) и спада (начиная с 2009 г.). В первый период российская доля производства составляла до 1,5 % от мирового, во втором достигла пика в 7,5 % в 2008 г., в третьем медленно снижалась до 2,4 % в 2019 г. Доля российского потребления ферромолибдена в начале 0-х гг. XX в. (2,0–2,5 тыс. т/год) составляли 7–10 % от мировых, но к 1996–1998 гг. они снизились до 2,6–2,8 % (1–2 тыс. т/год) и в принципе на этом уровне они держались до 2008 г. Всплеск российского потребления ферромолибдена в 1999–2002 гг. до 5–11 % от мирового был результатом роста спроса до 3–4 тыс. т/год на фоне стабильного уровня мирового потребления. Бурный рост в дальнейшем мирового спроса на ферромолибден на фоне ровного уровня российского потребления в 2–3 тыс. т/год привел к снижению российских долей потребления до 0,6 % от мирового в 2017 г. В сравнении динамики долей российского производства и потребления ферромолибдена наблюдается снижение превышения производства над потреблением, начиная с 5,2 % абс. (87 % отн.) в 2009 г. до 0,7 % абс. (22 % отн.) в 2018 г. – как результат снижения экспортной составляющей.

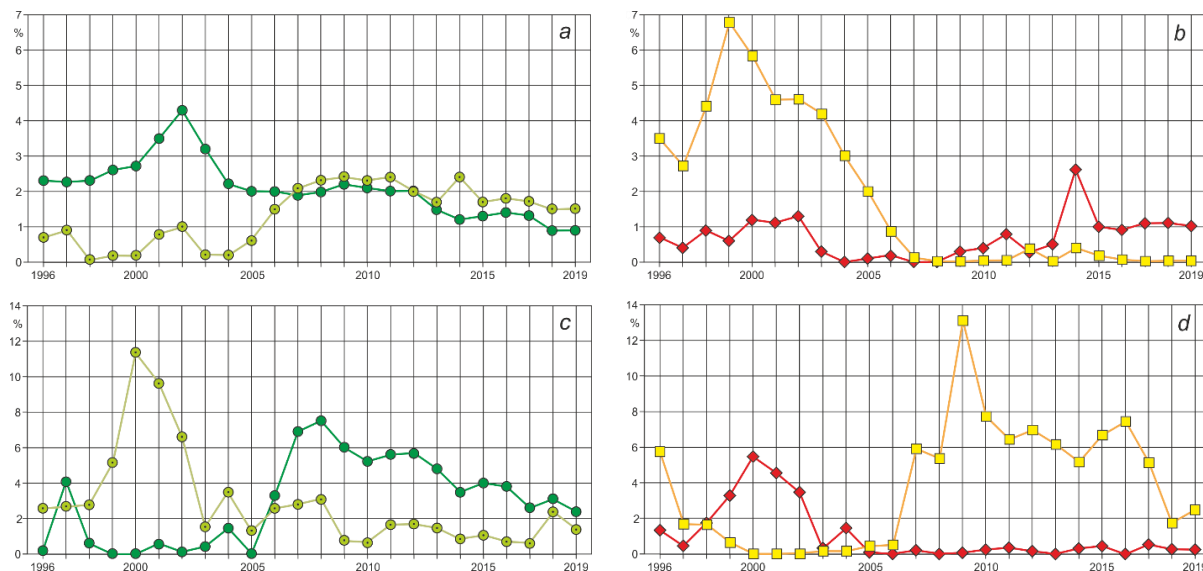
*Международная торговля.* Динамика долей российского экспорта молибденитового концентрата в мировой торговле (рис. 4, б) отражает инверсию внутреннего рынка этого товарного продукта, когда при ограниченности внутреннего потребления в 1996–2005 гг. его доля экспорта составляла 2,7–6,7 % мировой торговли, а после строительства новых ферромолибденовых заводов с 2007 г. экспорт практически прекратился. Доли российского импорта молибденового сырья в 1996–2003 гг. составляли 0,3–1,2 % мировой торговли, но это лишь отражение транзитных импортно-экспортных потоков. В 2004–2008 гг. импорт молибденитового концентрата практически прекратился, но начиная с 2009 г. опять начал расти: в 2009–2013 гг. – 0,3–0,8 %, в 2015–2019 гг. – 0,9–1,1 % от мировой торговли. Как видим, доля российского рынка в мировой торговле крайне мала.

В динамике долей российского экспорта ферромолибдена (рис. 4, б) зеркально повторяется инверсия внутреннего рынка молибденитового концентрата – практически полное отсутствие экспорта до 2006 г. и,



наоборот, значительная доля российского экспорта начиная с 2007 г. В мировой торговле доля российского экспорта во втором периоде составляла 5–13 %, и лишь в 2018–2019 гг. снизилась до 1,8–2,5 %.

Доля же российского импорта ферромolibдена в мировой торговле начиная с 2005 г. практически нулевая, в полном соответствии с экспортной направленностью этого ферросплава.



**Рис. 4.** Динамика долей объемов: а) производства (●) и потребления (◊) молибденитового концентрата в России от его мирового производства; б) российского импорта (◆) и экспорта (◻) молибденитового концентрата от объемов его мировой международной торговли; в) производства (●) и потребления (◊) ферромolibдена в России от его мирового производства; д) российского импорта (◆) и экспорта (◻) ферромolibдена от объемов его мировой международной торговли. Рассчитано по обобщенным данным [10–15]

**Fig. 4.** Dynamics of particles weight: а) production (●) and consumption (◊) of molybdenum concentrate in Russia from its world production; б) Russian import (◆) and export (◻) of molybdenum concentrate from the volume of its global international trade; в) production (●) and consumption (◊) of ferromolybdenum in Russia from its world production; д) Russian imports (◆) and exports (◻) of ferromolybdenum from the volume of its global international trade. Calculated according to the generalized data [10–15]

#### Направления развития молибденовой отрасли России

В целом ситуация в молибденовой отрасли сложная, но не критичная. Добывающие и ферросплавные мощности достаточны для обеспечения внутреннего потребления и поставок на экспорт. Серьёзная проблема лишь в неупорядоченности мировых цен на молибденовые продукты, в результате чего отношение инвесторов к проектам развития молибденовой отрасли весьма осторожное. Тем не менее улучшить ситуацию в российской молибденовой промышленности можно осуществлением следующих начинаний:

- 1) вовлечением в эксплуатацию новых молибденовых месторождений;
- 2) использованием новых технологий обогащения и переработки молибденового сырья;
- 3) восстановлением остановленных добывающих и перерабатывающих предприятий.

*Вовлечение в эксплуатацию новых молибденовых месторождений.* Наличие устойчивого импортного потока молибденового сырья является основанием для расширения его национальной добычи. Имеются уже подготовленные молибденовые месторождения,

которые могут быть вовлечены в эксплуатацию, а также разведываются новые (таблица) [10]. Агаскырское молибденовое месторождение (Республика Хакасия) подготавливается к освоению в качестве дополнительного источника сырья Сорского ГОКа. Уральская горно-металлургическая компания подготавливает к разработке Южно-Шамейское вольфрам-молибденовое месторождение (Свердловская область) с годовым выпуском 1 тыс. т молибденитового концентрата. Группа компаний «Онэксим» финансирует проект разработки Ак-Сугского медно-порфирового месторождения (Республика Тыва), на котором ожидается выпуск 2,3 тыс. т молибденового концентрата, который планируется на месте перерабатывать с получением парамолибдат аммония. Ввиду падения цен на молибденовые продукты приостановлены работы ГМК «Норильский Никель» по освоению Бурдаинского молибденового месторождения (Забайкальский край), достаточно качественного, но находящегося вне развитой транспортной инфраструктуры. Из других российских месторождений наибольший интерес представляют объекты, находящиеся в освоенных

Из других молибденовых продуктов в Россию импортируется (т/год): оксиды молибдена – 500–800, молибдаты – 65–130, молибденовые прутки – 70–135, молибден необработанный – до 65, порошки молибденовые – 15–50, молибденовая проволока – 15–20 [12]. На экспорт из России направляется (т/год): молибден необработанный – 150–570, молибденовые отходы – 15–70, порошки молибденовые – 15–50 [12].

районах, – Коклановское вольфрам-молибденовое (Курганская область), Жарчихинское молибденовое (Республика Бурятия) и Лобаш (Республика Карелия).

*Использование новых технологий обогащения и переработки молибденового сырья.* Молибденовые и медно-порфиновые (медно-молибденовые) руды в большинстве случаев являются легкообогащаемыми с использованием относительно дешевой технологии флотации сульфидов. Тем не менее и здесь возможны улучшения технологии обогащения молибденовых руд: крупнокусковая сортировка исходного рудного материала с использованием рентген-радиометрии [28], предварительной гравитационной турбулизационной центробежной сепарации пульпы [29].

Более проблемно обогащение сложных вольфрам-молибденовых руд (сростки рудных и породных минералов) и окисленных молибденовых (повеллитовых) руд, а также техногенных отходов (хвостов обогащения, лежалых бедных руд). Для таких проблемных материалов рекомендуются технологии кучного и чанового выщелачивания молибдена (и меди) как из самой рудной массы, так и из промпродуктов и концентратов [30, 31], а также технологии биовыщелачивания меди и молибдена из рудной массы [32], термической возгонки оксидов молибдена и вольфрама из концентратов [33–35], ликвационной плавки вольфрам-молибденового концентрата с последующим получением молибдатов и вольфраматов [36], отжиг концентрата с получением молибдата кальция [37].

В производстве ферромолибдена [38, 39] также возможно развитие инновационных технологий, способствующих сокращению времени технологических процессов, финансовых издержек и повышению качества выпускаемых продуктов:

- прямое использование молибденитового концентрата для производства ферромолибдена [40, 41];
- получение высокочистого ферромолибдена (без вторичных примесей) в процессе гидрогенного восстановления [42];
- рециклинг отходов производства ферромолибдена [43];
- снижение энергоёмкости производства ферросплавов [44] и др.

Как вариант развития российского рынка молибденовых продуктов можно предложить увеличение производства таких товаров, как оксиды молибдена и молибдаты, которые по объемам в международной торговле занимают третье (28–30 тыс. т/год) и четвертое места (14–16 тыс. т/год) после молибденитового концентрата и ферромолибдена.

*Восстановление остановленных добывающих и перерабатывающих предприятий.* Создание новых технологий обогащения, повышающих экономическую эффективность добычи, обогащения и переработки молибденового сырья, позволяет по-новому рассмотреть возобновление производств на Тырнаузском ГОКе, прекратившем работы в 2000 г., а также на Жирекенском ГОКе и Жирекенском ферромолибденовом заводе, остановленных в 2013 г.

Проект возобновления разработки Тырнаузского вольфрам-молибденового месторождения с 2018 г.

ведется ООО «Эльбрусский горнорудный комбинат» (Государственной корпорацией «Ростех»). Проект предусматривает новое строительство рудника, обогатительной фабрики с годовым выпуском 10 тыс. т шеелитового и 0,8 тыс. т молибденитового концентратов, гидрометаллургического завода, ориентированного на выпуск оксида вольфрама (до 4,5 тыс. т/год). Проектирование нового производства позволяет внедрять и использовать новые технологии добычи и переработки вольфрам-молибденового сырья [45]. Как вариант рассматривается также вовлечение в производство близлежащего резервного Кти-Тырнаузского вольфрам-молибденового месторождения. Тем не менее реализацию строительства Тырнаузского горно-металлургического комплекса осложняют ценовые риски вольфрамовой продукции – основной продукции этого проекта [21].

Жирекенские горно-обогатительный комбинат и ферросплавный завод были остановлены в 2013 г. управляющей компанией «Союзметаллресурс» в результате убыточности производства от снижения мировых цен на молибденовые продукты. Основная же проблема этих производств – их градообразующий статус с необходимостью содержания жилищно-коммунального комплекса п. Жирекен. В настоящее время АО «УК «Союзметаллресурс» избавляется от Жирекенского ГОКа и Жирекенского ФМЗ (а также жилищно-коммунального комплекса п. Жирекен), как неликвидных активов, а ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (г. Краснокаменск, Забайкальский край) рассматривает вопрос об их приобретении. Законсервированные производственные мощности пока еще возможны для реального их восстановления, особенно производственный комплекс недавно построенного ферромолибденового завода. В случае приобретения прав собственности на эти активы ПАО «Приаргунское ПГХО» наиболее реален вариант перемещения оборудования Жирекенского ФМЗ на Гидрометаллургический завод Приаргунского ПГХО в г. Краснокаменск и организация его работы на импортируемом молибденовом сырье. При расконсервировании же добывающих и обогатительных производств Жирекенского ГОКа следует рассмотреть возможность улучшения их экономических показателей за счет внедрения технологических инноваций [28, 29].

Выход из экономических кризисных ситуаций всегда возможен, что и было осуществлено при банкротстве в 2017 г. второго в России по объемам выпуска ферромолибдена АО «Камышинский литейно-ферросплавный завод» путем выделения активов ферромолибденового производства в новое предприятие ООО «Нижневожский ферросплавный завод» (г. Камышин, Волгоградская область).

#### Выводы

1. До 2005 г. молибденовая отрасль России находилась в кризисном состоянии дисгармонии производства молибденового сырья и его переработки, обусловившей значительную долю экспорта добытого и ре-экспорт импортируемого молибдени-

тового концентрата при стагнации национального производства ферромолибдена и молибдена металлического. В результате резкого увеличения в 2004–2008 гг. мировых цен на практически все молибденовые продукты стали привлекательны инвестиции в проекты молибденовой отрасли. Построены новые ферромолибденовые заводы, началась подготовка проектов добычи молибдена на новых месторождениях, появился значительный экспортный поток ферромолибдена. Спад мировых цен на молибденовые продукты начиная с 2009 г. привел к откату активности в молибденовой отрасли России, но в целом ее состояние не критично.

2. Производство (добыча) российских молибденовых руд и концентратов в 1996–2006 гг. составляло 6–8 тыс. т/год, на фоне роста потребления в 2009–2012 гг. оно выросло до 10–11 тыс. т/год, но в дальнейшем, на фоне падения мировых цен на молибденовые продукты, стало снижаться, вплоть до 5,5 тыс. т в 2019 г. Экспортная ориентация молибденитового концентрата в период с 1996 по 2004 гг. (4–10 тыс. т/год, или 70–100 %) сменилась на национальное потребление с нулевым экспортом. Импортный поток молибденитового концентрата в 1996–2004 гг. (1–2,3 тыс. т/год) с последующим ре-экспортом в 2004–2008 гг. практически исчез, но после падения мировых цен на него, начиная с 2009 г., сформировался новый поток импорта молибденового сырья (2,3–3,2 тыс. т/год, или 20–36 % от потребления) и национальный рынок молибденовых руд и концентратов формально стал импортозависимым. Среднегодовой уровень национального потребления молибденитового концентрата в России составляют 10–11 тыс. т/год, что достаточно для производства до 8 тыс. т/год ферромолибдена + до 1,0 тыс. т/год молибдена металлического. Налицо необходимость наращивания национального производства (добычи) молибденовых руд и концентратов. Тем не менее доля добычи российского молибденового сырья в его мировом производстве упала с 3,5 % в 2001 г. до 0,9 % в 2019 г.
3. Если в 1996–2005 гг. производство российского ферромолибдена было крайне мало (0,05–1,5 тыс. т/год), то резкий подъем мировых цен на него простимулировал строительство Сорского и Жи-

рекенского ферромарганцевых заводов и увеличение российского предложения этого продукта до 7 тыс. т к 2007 г., которое достигло максимума – 9,1 тыс. т – в 2012 г. На фоне падения мировых цен на ферромолибден его российское производство стало снижаться, вплоть до 4,6 тыс. т в 2019 г. Российское потребление ферромолибдена в 1996–2005 гг. перекрывалось в основном по импорту (0,3–3,7 тыс. т/год), а после развития его национального производства импортный поток стал незначительным (1–5 % от потребления). Избыток производства ферромолибдена сформировал новый экспортный поток, достигший в 2009 г. максимума в 8,2 тыс. т, но на фоне снижения мировых цен на ферромолибден в дальнейшем происходит снижение объемов его экспорта до 1,7 тыс. т в 2018 г. Таким образом, ферромолибден начиная с 2006 г. стал импортнезависимым, а с 2007 г. еще и экспортноориентированным. Если в 1998–2005 гг. доля российского производства ферромолибдена в его мировом предложении составляла 0,6–1,5 %, то в 2012 г. она увеличилась до 5,7 %, но затем на фоне роста мирового производства этого товара она начала снижаться вплоть до 2,4 % в 2019 г.

4. Улучшение ситуации в российской молибденовой промышленности возможно осуществлением следующих начинаний: вовлечение в эксплуатацию новых молибденовых месторождений (собственно молибденовых Агаскырского и Бурдаинского, Ак-Сугского меднопорфирирового, Южно-Шамейско-вольфрам-молибденового); использование новых технологий обогащения (крупнокусковой рентгено-радиометрической сепарации, гравитационной турбулизационной центробежной сепарации пульпы) и переработки (кучное и чановое выщелачивание, биовыщелачивание, возгонки оксидов молибдена, ликвационная плавка концентрата) молибденового сырья; восстановление остановленных добывающих (Жирекенского и Тырнаузского ГОКов) и перерабатывающих (Жирекенского ферромолибденового и Тырнаузского гидрметаллургического заводов) предприятий; создание производства новых товарных продуктов (оксидов молибдена и молибдатов), составляющих значительные по объемам товарные потоки в международной торговле.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка современных тенденций в производстве молибдена, его сплавов и молибденосодержащей продукции / Г.В. Галевский, О.А. Полях, В.В. Руднева, А.Е. Аникин // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2020. – Т. 76. – № 8. – С. 780–789.
2. Покалов В.Т. Пути решения проблемы обеспечения промышленности России легирующими металлами // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 1993. – № 5. – С. 12–15.
3. ГОК «Эрдэнэт»: история и перспективы развития / Ю.Г. Данилов, В.В. Никифорова, С.П. Леонтьев, Н.Н. Константинов, Д.В. Хосоев // *Горная промышленность*. – 2019. – № 5 (147). – С. 24–27.
4. Ильина В.А., Романов С.М. Современное состояние и перспективы развития производства молибдена в России // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № S217. – С. 19–22.
5. Елсукова М.А. Рынок молибдена в мире и России // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2014. – № 4. – С. 78–81.
6. The prediction of molybdenum mineral demand and supply in China / Z.-Z. Zhang, X.-W. Wang, J.-F. Zhang, G.-Y. Jiang, Q.-D. Fan // *Acta Geoscientica Sinica*. – 2017. – V. 38. – № 1. – P. 69–76. DOI: 10.3975/cagsb.2017.01.11
7. Editorial: industrial relevance of molybdenum in China / T. Outteridge, N. Kinsman, G. Ronchi, H. Mohrbacher // *Advances in Manufacturing*. – 2020. – V. 8. – № 1. – P. 35–39. DOI: 10.1007/s40436-019-00270-5.

8. 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 01.11.2020).
9. 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 01.11.2020).
10. Государственные доклады «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». 2000–2018 гг. URL: [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syryevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gos\\_udarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syryevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syryevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gos_udarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syryevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения 01.11.2020).
11. Федеральная служба государственной статистики России. URL: <https://gks.ru/emiss> (дата обращения: 01.11.2020).
12. Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.ru/analytics/> (дата обращения: 01.11.2020).
13. Мир информации. UNdata. URL: <https://data.un.org/> (дата обращения: 01.11.2020).
14. Международная торговля товарами. TrendEconomy. URL: <http://data.trendeconomy.ru/dataviewer/trade/statistics/> (дата обращения: 01.11.2020).
15. Исследовательская группа ИНФОМАЙН. URL: <http://www.infomine.ru/> (дата обращения: 01.11.2020).
16. Покалов В.Т. Локальный прогноз месторождений молибдена // Локальное прогнозирование плутоногенных месторождений молибдена, вольфрама и олова. – М.: Недра, 1985. – С. 14–102.
17. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state of the art and outlook / N.S. Bortnikov, A.V. Volkov, A.L. Galyamov, I.V. Vikent'ev, V.V. Aristov, A.V. Lalomov, K.Y. Murashov // *Geology of Ore Deposits*. – 2016. – V. 58. – № 2. – P. 83–103. DOI: 10.1134/S1075701516020021.
18. Лаптева А.М., Митрофанов Н.П., Тигунов Л.П. Минерально-сырьевая база легирующих металлов: состояние, проблемы и перспективы освоения // *Горный журнал*. – 2017. – № 7. – С. 19–24. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.02.
19. Алешин Д.С., Халезов Б.Д., Крашенинин А.Г. Сырьевая база молибдена // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2019. – № 7. – С. 113–121.
20. О комплексном освоении недр и территорий в сложных природно-климатических условиях / В.Л. Яковлев, С.В. Корнилов, И.Ю. Рассказов, С.М. Ткач // *Горный журнал*. – 2019. – № 6. – С. 84–89. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.12.
21. Хатьков В.Ю., Боярко Г.Ю. Современное состояние вольфрамовой промышленности России // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 124–137. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/114.
22. Хатьков В.Ю., Боярко Г.Ю. Мировые и российские встречные импортно-экспортные потоки минерального сырья // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 145–167.
23. Molybdenum deposits in China / Y.-J. Chen, F. Pirajno, N. Li, X.-H. Deng // *Ore Geology Reviews*. 2017. – V. 81. – P. 401–404. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.11.002
24. Polyak D.E. Molybdenum [Advance Release]. 2017 Minerals Yearbook. – U.S. Geological Survey. – 2020. – 13 p. URL: <https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2017-molyb.pdf> (дата обращения: 10.05.2018).
25. Nekrasov V.M. Status of ferroalloy production in Russia // *Litezhnoe Proizvodstvo*. – 1999. – № 4. – P. 3–4.
26. Status and prospects of ferroalloys production in the Russian Federation / L.I. Leon'tev, L.A. Smirnov, V.I. Zhuchkov, A.V. Zhdanov, V.Y. Dashevskii, S.A. Gurova // *Metallurgist*. – 2016. – V. 59. – № 11–12. – P. 1001–1006. DOI: 10.1007/s11015-016-0206-x.
27. Боярко Г.Ю., Матвеев Б.Н. Материально-сырьевая база ферросплавов и особенности развития их производства в России. Часть 2. Микролегирующие ферросплавы // *Черные металлы*. – 2020. – № 2. – С. 15–20.
28. Способ радиометрического обогащения минерального сырья: пат. Рос. Федерация RU 2248245 C2, 20.03.2005; заявл. 05.05.2003; опубл. 20.03.2005. Бюл. № 8. – 11 с.
29. Инновационные технологии переработки вольфрамосодержащих хвостов обогатительной фабрики Жамбыл / А.С. Шевченко, Ю.П. Морозов, М.Р. Шаутенов, И.Х. Хамидулин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 3-1. – С. 443–452.
30. Способ извлечения окисленного молибдена при переработке смешанных молибденовых руд: пат. Рос. Федерация RU 2234548 C2, 20.08.2004; заявл. 13.08.2002; опубл. 20.08.2004. – 4 с.
31. Геворкян Г.Г., Мусаелян А.В. Технично-экономическое обоснование переработки хвостов обогащения руд цветных металлов // *Вестник Национального политехнического университета Армении. Metallurgy, материаловедение, недропользование*. – 2018. – № 1. – С. 96–103.
32. Пестряк И.В., Хандмаа С., Баатархуу Ж. Повышение эффективности комбинированной флотационно-биогидрометаллургической переработки медно-молибденовых руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2011. – № 11. – С. 209–215.
33. Способ комплексной переработки хвостов флотационного обогащения молибдено-вольфрамовых руд: пат. Рос. Федерация RU 2509168 C1, 10.03.2014; заявл. 06.11.2012; опубл. 10.03.2014. Бюл. № 7. – 12 с.
34. Способ флотационной переработки текущих и лежалых хвостов обогащения, содержащих минералы меди и молибдена: пат. Рос. Федерация RU 2539448 C1; 20.01.2015. заявл. 17.10.2013. опубл. 10.03.2014. Бюл. № 7. – 12 с.
35. Prospects for involvement of low-grade molybdenum and tungsten concentrates in metallurgical processing / A.S. Medvedev, P.V. Aleksandrov, B.Z. Razykov, A.O. Rodionov, O.V. Sannikova // *Metallurgist*. – 2013. – V. 57. – № 3–4. – P. 261–267. DOI: 10.1007/s11015-013-9722-0.
36. Хантургаева Г.И. Комбинированные технологии комплексной переработки труднообогатимых молибденовых и вольфрамовых руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2009. – № S14. – С. 478–494.
37. Gudkova I.Y., Vusikhis A.S., Lempert D.B. Oxidative roasting of molybdenite concentrate with formation of calcium molybdate carried out in the mode of filtration combustion // *Russian Chemical Bulletin*. – 2016. – V. 65. – № 10. – P. 2396–2399. DOI: 10.1007/s11172-016-1595-5
38. Gasik M. Technology of molybdenum ferroalloys // *Handbook of ferroalloys*. – Espoo, Finland: Elsevier, 2013. – P. 387–396. DOI: 10.1016/B978-0-08-097753-9.00012-5.
39. Swinbourne D.R., Arnout S. Thermodynamic model of metallothermic smelting of ferromolybdenum // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. – 2019. – V. 128. – № 3. – P. 193–204. DOI: 10.1080/03719553.2017.1421421
40. Gasparyan Yu.B. Technology for producing the molybdenum and ferromolybdenum by direct reduction of sulfide concentrates // *Metallurg*. – 2001. – № 8. – P. 28–29.
41. Golmakani M.H., Vahdati-Khaki J., Babakhani A. A novel method for direct fabrication of ferromolybdenum using molybdenite via self-propagation high temperature synthesis // *Materials Chemistry and Physics*. – 2017. – V. 194. – P. 9–16. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.03.017.
42. A novel process for producing ferromolybdenum powder master alloy without generating secondary pollutants through a two-step hydrogen reduction process / B.-S. Kim, S.-B. Kim, H.-I. Lee, Y.-Y. Choi // *Materials Transactions*. – 2011. – V. 52. – № 6. – P. 1288–1293. DOI: 10.2320/matertrans.M2011037.
43. Selective leaching and recovery of V as iron vanadate from industrially generated Mo-V residue / P.C. Rout, G.K. Mishra, D. Mohapatra, B. Padh, B.R. Reddy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2018. – V. 28. – № 11. – P. 2368–2374. DOI: 10.1016/S1003-6326(18)64882-4.
44. Zhuchkov V.I., Dashevskij V.Ya. New resource-saving processes for manufacturing the ferroalloys // *Cailiao Kexue yu Gongyi/Material Science and Technology*. – 1998. – V. 6. – № 2. – P. 22–23.

45. Иванков С.И., Литвинцев Э.Г., Петкевич Д.Г. Проблемы создания современных экологически малонапряженных технологий переработки комплексных вольфрамовых руд и пути их решения // Научные и технические аспекты охраны окружа-

ющей среды. Обзорная информация. – 2013. – Вып. 3. – С. 1–138.

*Поступила 13.01.2021 г.*

**Информация об авторах**

**Боярко Г.Ю.**, доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Хатьков В.Ю.**, начальник департамента 817 ПАО «Газпром»; соискатель Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 339.13:669.28

## CURRENT STATE OF MOLYBDENUM INDUSTRY 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.

**Relevance** of the work is caused by the need to study the problems of the Russian molybdenum industry.

**Objective:** to study the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of molybdenum products (molybdenum concentrates and ferromolybdenum), their prices (world, Russian imports and exports) and the share of Russian molybdenum products in the world economy; to develop recommendations for optimizing the turnover of molybdenum products.

**Research methods:** statistical, graphical, logical.

As a result of the analysis of the dynamics in commodity flows of molybdenum products and prices for them, the results of the activities of mining and processing enterprises, significant changes in the state of the Russian molybdenum industry are established. Until 2005, the Russian molybdenum industry was in a state of crisis, exporting a significant part of the molybdenum concentrate and importing most of the consumed ferromolybdenum. As a result of a sharp increase in 2004–2008 in the world prices for almost all molybdenum products the investments into projects in the molybdenum industry have become attractive. New ferromolybdenum plants were built (Sorsky and Zhirekensky), preparation of projects for molybdenum extraction at new fields (Agaskyrskoye and Burdainskoye molybdenum fields, Ak-Sug copper-porphry, Yuzhno-Shameyskoye tungsten-molybdenum), and significant export flow of ferromolybdenum appeared. The decline in global prices for molybdenum products since 2009 has led to a pullback in activity in the Russian molybdenum industry, but this is not critical. The extraction of molybdenum raw materials ceased to be export-oriented, and with the appearance of a deficit in national consumption, formal import dependence (20–36 % of consumption) also appeared. There is a need to increase national production (extraction) of molybdenum ores and concentrates. A fundamentally new technological flow of transit import-export trade was formed, when molybdenum concentrate is imported, and the ferromolybdenum produced from it is sent for export. To improve the situation in the Russian molybdenum industry, it is recommended to: accelerate the recovery of stopped mining and processing enterprises; involve new molybdenum deposits in operation; use new technologies for processing molybdenum raw materials; organize the production of new commodity products – molybdenum oxides and molybdates.

**Key words:**

Russian molybdenum industry, molybdenum concentrates, ferromolybdenum, commodity flows, import cost.

**REFERENCES**

- Galevskiy G.V., Polyakh O.A., Rudneva V.V., Anikin A.E. Assessment of current trends in the production of molybdenum, its alloys and molybdenum-containing products. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*, 2020, vol. 76, no. 8, pp. 780–789. In Rus.
- Pokalov V.T. Ways to solve the problem of providing Russian industry with alloying metals. *Mineral resources of Russia. Economics and management*, 1993, no. 5, pp. 12–15. In Rus.
- Danilov Yu.G., Nikiforova V.V., Leont'ev S.P., Konstantinov N.N., Khosoev D.V. Erdenet M&PP: history and development prospects. *Russian Mining Industry*, 2019, no. 5 (147), pp. 24–27. In Rus.
- Ilina V.A., Romanov S.M. Current state and prospects of development of molybdenum production in Russia. *Mining informational and analytical bulletin*, 2013, no. S217, pp. 19–22. In Rus.
- Elsukova M.A. Molybdenum market in the world and Russia. *Mineral resources of Russia. Economics and management*, 2014, no. 4, pp. 78–81. In Rus.
- Zhang Z.-Z., Wang X.-W., Zhang J.-F., Jiang G.-Y., Fan Q.-D. The prediction of molybdenum mineral demand and supply in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2017, vol. 38, no 1, pp. 69–76. DOI: 10.3975/cagsb.2017.01.11.
- Outteridge T., Kinsman N., Ronchi G., Mohrbacher H. Editorial: industrial relevance of molybdenum in China. *Advances in Manufacturing*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 35–39. DOI: 10.1007/s40436-019-00270-5.
- 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: 1 November 2020).
- 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/language-en> (accessed: 1 November 2020).
- Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2016–2017 godakh» [State report «State and use of mineral resources of the Russian Federation in 2016–2017]. Available at: [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (accessed: 1 November 2020).
- Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Rossii [Federal state statistics service of Russia]. Available at: <https://gks.ru/emiss> (accessed: 1 November 2020).
- Federalnaya tamozhennaya sluzhba Rossii [Federal customs service of Russia]. Available at: <http://stat.customs.ru/analytics/> (accessed: 1 November 2020).
- A world of information. UNdata. Available at: <https://data.un.org/Search.aspx?q=molybdenum> (accessed: 1 November 2020).
- TrendEconomy. Available at: <http://data.trendeconomy.ru/dataviewer/trade/statistics/> (accessed: 1 November 2020).
- Issledovatel'skaya grupa INFOMAJN [INFOMINE research group]. Available at: <http://www.infomine.ru/> (accessed: 1 November 2020).

16. Pokalov V.T. Lokalny prognoz mestorozhdeniy molibdena [Local forecast of molybdenum deposits]. *Lokalnoe prognozirovanie plutogennykh mestorozhdeniy molibdena, volframa i olova* [Local forecasting of plutogenic deposits of molybdenum, tungsten and tin]. Moscow, Nedra Publ., 1985. pp. 14–102.
17. Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikent'ev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.Y. Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 83–103. DOI: 10.1134/S1075701516020021.
18. Lapteva A.M., Mitrofanov N.P., Tigonov L.P. Alloying metal supply: State-of-the art, problems & prospects. *Gornyi Zhurnal*, 2017, no. 7, pp. 10–16. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.02.
19. Aleshin D.S., Khalezov B.D., Krasheinin A.G. Raw material base of molybdenum. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyi zhurnal*, 2019, no. 7, pp. 113–121. In Rus.
20. Yakovlev V.L., Kornilov S.V., Rasskazov I.Y., Tkach S.M. Integrated subsoil use and territorial development in difficult natural environments and adverse climatic conditions. *Gornyi Zhurnal*, 2019, no. 6, pp. 84–89. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.12. In Rus.
21. Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu. Current state of tungsten industry in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 124–137. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/114. In Rus.
22. Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu. World and Russian counter import/export flows of mineral products. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 145–167. In Rus.
23. Chen Y.-J., Pirajno F., Li N., Deng X.-H. Molybdenum deposits in China. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 81, pp. 401–404. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.11.002.
24. Polyak D.E. Molybdenum [Advance Release]. 2017. *Minerals Yearbook*. U.S. Geological Survey, 2020. 13 p. Available at: <https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2017-molyb.pdf> (accessed: 1 November 2020).
25. Nekrasov V.M. Status of ferroalloy production in Russia. *Litejnoe Proizvodstvo*, 1999, no. 4, pp. 3–4.
26. Leont'ev L.I., Smirnov L.A., Zhuchkov V.I., Zhdanov A.V., Dashevskii V.Y., Gurova S.A. Status and prospects of ferroalloys production in the Russian Federation. *Metallurgist*, 2016, vol. 59, no. 11–12, pp. 1001–1006. DOI: 10.1007/s11015-016-0206-x.
27. Boyarko G.Yu., Matveev B. N. The raw material base of ferroalloys and features of development of their production in Russia. Part 2. Microalloying ferroalloys. *Chernye metally*, 2020, no. 2, pp. 15–20. In Rus.
28. Levitin A.I., Ponomarev V.S. *Sposob radiometricheskogo obogashcheniya mineralnogo syr'ya* [Method for radiometric enrichment of mineral raw materials]. Patent RF, no. RU 2248245 C2, 2005.
29. Shevchenko A.S., Morozov Yu.P., Shautenov M.R., Khamidulin I.Kh. Innovative technologies for processing tungsten-containing tailings of the Zhambyl processing plant. *Mining informational and analytical bulletin*, 2020, no. 3-1, pp. 443–452. In Rus.
30. Kostromina I.V., Dobromyslov Yu.P., Sekisov G.V. *Sposob izvlecheniya oksislennogo molibdena pri pererabotke smeshannykh molibdenovykh rud* [Method for extracting oxidized molybdenum in the processing of mixed molybdenum ores]. Patent RF, no. RU 2234548 C2, 2004.
31. Gevorkyan G.G., Musaelyan A.V. Feasibility study for processing tailings for processing non-ferrous metal ores. *Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, materials science, subsurface use*, 2018, no. 1, pp. 96–103. In Rus.
32. Pestryak I.V., Khandmaa S., Baatarkhuu Zh. Improving the efficiency of combined flotation-biohydrometallurgical processing of copper-molybdenum ores. *Mining informational and analytical bulletin*, 2011, no. 11, pp. 209–215. In Rus.
33. Ryakhovskiy V.M., Kononov O.V., Bychkov A.Yu., Komarova Ya.S., Oleynikova O.V., Blaev B.Kh., Khakulov V.A., Postavnin B.N. *Sposob kompleksnoy pererabotki khvostov flotatsionnogo obogashcheniya molibdenovolframovykh rud* [Method for complex processing of tailings of flotation enrichment of molybdenum-tungsten ores]. Patent RF, no. RU 2509168 C1, 2014.
34. Zimin A.V., Nazarov Yu.P., Gehzegt Sh. *Sposob flotatsionnoy pererabotki tekushchikh i lezhalykh khvostov obogashcheniya, sodержashchikh mineraly medi i molibdena* [Method for flotation processing of current and stale enrichment tailings containing copper and molybdenum minerals]. Patent RF, no. RU 2539448 C1, 2015.
35. Medvedev A.S., Aleksandrov P.V., Razykov B.Z., Rodionov A.O., Sannikova O.V. Prospects for involvement of low-grade molybdenum and tungsten concentrates in metallurgical processing. *Metallurgist*, 2013, vol. 57, no. 3–4, pp. 261–267. DOI: 10.1007/s11015-013-9722-0.
36. Khandurgaeva G.I. Combined technologies for complex processing of hard-to-enrich molybdenum and tungsten ores. *Mining informational and analytical bulletin*, 2009, no. S14, pp. 478–494. In Rus.
37. Gudkova I.Y., Vusikhis A.S., Lempert D.B. Oxidative roasting of molybdenite concentrate with formation of calcium molybdate carried out in the mode of filtration combustion. *Russian Chemical Bulletin*, 2016, vol. 65, no. 10, pp. 2396–2399. DOI: 10.1007/s11172-016-1595-5
38. Gasik M. Technology of molybdenum ferroalloys. *Handbook of ferroalloys*. Espoo, Finland, Elsevier, 2013. pp. 387–396. DOI: 10.1016/B978-0-08-097753-9.00012-5.
39. Swinbourne D.R., Arnout S. Thermodynamic model of metallothermic smelting of ferromolybdenum. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, 2019, vol. 128, no. 3, pp. 193–204. DOI: 10.1080/03719553.2017.1421421.
40. Gasparyan Yu.B. Technology for producing the molybdenum and ferromolybdenum by direct reduction of sulfide concentrates. *Metallurg*, 2001, no. 8, pp. 28–29.
41. Golmakani M.H., Vahdati khaki J., Babakhani A. A novel method for direct fabrication of ferromolybdenum using molybdenite via self-propagation high temperature synthesis. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, vol. 194, pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.03.017.
42. Kim B.-S., Kim S.-B., Lee H.-I., Choi Y.-Y. A novel process for producing ferromolybdenum powder master alloy without generating secondary pollutants through a two-step hydrogen reduction process. *Materials Transactions*, 2011, vol. 52, no. 6, pp. 1288–1293. DOI: 10.2320/matertrans.M2011037.
43. Rout P.C., Mishra G.K., Mohapatra D., Padh B., Reddy B.R. Selective leaching and recovery of V as iron vanadate from industrially generated Mo-V residue. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, vol. 28, no. 11, pp. 2368–2374. DOI: 10.1016/S1003-6326(18)64882-4
44. Zhuchkov V.I., Dashevskij V.Ya. New resource-saving processes for manufacturing the ferroalloys. *Cailiao Kexue yu Gongyi/Material Science and Technology*, 1998, vol. 6, no. 2, pp. 22–23.
45. Ivankov S.I., Litvintsev E.G., Petkevich D.G. Problems of creation of modern environmentally low-stress technologies of processing of complex tungsten ores and ways of their solution. *Scientific and technical aspects of environmental protection. Overview information*, 2013, vol. 3, pp. 1–138.

Received: 13 January 2021.

#### Information about the authors

**Grigory Yu. Boyarko**, Dr. Sc., Cand. Sc., professor National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vitaly Yu. Khatkov**, head of the department 817, Gazprom; postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.42(269.718):504.054

## ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПЛАВАЮЩИМ МОРСКИМ МУСОРОМ ПО ДАННЫМ СУДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В 2019 Г.

Погожева Мария Петровна<sup>1,2</sup>,  
pogojeva\_maria@mail.ru

Якушев Евгений Владимирович<sup>1,3</sup>,  
evgeniy.yakushev@niva.no

Терский Петр Николаевич<sup>2</sup>,  
peter.tersky@gmail.com

Глазов Дмитрий Михайлович<sup>4</sup>,  
dglazov@yandex.ru

Аляутдинов Вадим Алиевич<sup>2</sup>,  
vada.90@mail.ru

Коршенко Александр Николаевич<sup>2</sup>,  
korshenko58@mail.ru

Ханке Георг<sup>5</sup>,  
georg.hanke@ec.europa.eu

Семилетов Игорь Петрович<sup>6</sup>,  
igorism@poi.dvo.ru

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук,  
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36.

<sup>2</sup> Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет,  
Россия, 119034, г. Москва, Крпоткинский пер., 6.

<sup>3</sup> Норвежский институт водных исследований,  
Норвегия, 0349, г. Осло, Гаустадаллеен, 21.

<sup>4</sup> Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук,  
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский пр., 33.

<sup>5</sup> Объединенный научный центр,  
Италия, 21027, г. Испра, Виа Е.Ферми, 2749.

<sup>6</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук,  
Россия, 60041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

**Актуальность** исследования обусловлена постоянно увеличивающимся накоплением пластикового мусора в морской среде, что вызывает серьезную обеспокоенность как у научного сообщества, так и у широкой общественности. Мусор оказывает все большее воздействие на живые организмы, качество морских вод и экосистемы в целом, часто затрагивая условия жизни и здоровья в том числе и человека. Учитывая глобальную циркуляцию водных масс, природные условия, а также постоянно возрастающую нагрузку, связанную с потеплением климата, Арктика потенциально может служить местом накопления пластиковых отходов.

**Целью** данной работы является оценка уровня загрязнения плавающим мусором Баренцева моря, включающая в себя получение новых данных об особенностях аккумуляции мусора на поверхности воды и обсуждение потенциальных источников его поступления и переноса.

**Объект:** плавающие на поверхности моря частицы различного происхождения (морской мусор).

**Методы.** В ходе экспедиции параллельно с визуальными наблюдениями было протестировано и применено мобильное приложение Floating Litter Monitoring (FLM), которое может использоваться для упрощения и стандартизации сбора данных о плавающем мусоре.

**Результаты.** Было обнаружено, что средняя плотность мусора на всех разрезах соответствует примерно 3,5 частиц/км<sup>2</sup>. На некоторых участках маршрута судна были отмечены множественные значительные зоны скопления плавающего морского мусора, ранее не упоминавшиеся в литературе. Сделаны предположения о возможных причинах скопления плавающего мусора в восточной части Баренцева моря, а также приводятся рекомендации по сокращению поступления количества мусора в морскую среду и проведению регулярных мониторинговых исследований с использованием стандартизированных методик.

### Ключевые слова:

Загрязнение морских вод, морской мусор, Арктика, Баренцево море, мониторинг.

### Введение

В настоящее время загрязнение морским мусором, особенно состоящим из пластика, является одной из наиболее актуальных проблем антропогенного воздействия на морскую среду в глобальном масштабе [1]. По текущим оценкам количество пластика, поступающего с суши в морскую среду ежегодно, варьируется от 4,5 до 12,7 млн т, а еще 1,75 млн т происходит из так называемых морских источников, таких

как рыболовство, аквакультура (рыбоводство) и судходство [2].

Макропластик (бутылки, пакеты и пр.) и микропластик (фрагменты и синтетические волокна размером менее 5 мм) [3] обнаруживаются во всех природных средах, включая моря. Наиболее распространенные формы пластика – полипропилен (бутылки) и полиэтилен (пакеты) – имеют плотность менее 1 г/см<sup>3</sup>, поэтому они всплывают на поверхность воды, в то



время как другие формы, такие как нейлон (рыболовные сети) и ПВХ (трубы), имеют большую плотность и могут тонуть и накапливаться в донных отложениях. Глубоководные условия с более холодными температурами и недостатком ультрафиолета особенно благоприятны для сохранения пластика. В таких условиях пластик может оставаться в донных отложениях в течение геологических масштабов времени [4].

В Мировом океане морской мусор переносится течениями и из-за особенностей глобальной циркуляции скапливается в центрах пяти антициклонических круговоротов, расположенных в тропических зонах, при этом значительное количество пластика атлантического происхождения переносится в Арктику. Результаты моделирования предсказывают формирование зоны накопления морского мусора в Баренцевом море [5]. Этот район Северного Ледовитого океана играет ключевую роль в формировании глубинных арктических вод в процессе охлаждения [6], большая часть атлантических вод достигает восточной части Баренцева моря [7]. Таким образом, плавающий морской мусор, поступающий с береговых источников густонаселенных районов Северной Атлантики, может вовлекаться в глобальную систему термохалинной циркуляции и в конечном счете переноситься с теплыми поверхностными водами северной части океана к высоким арктическим широтам. Это потенциально приводит к его накоплению в Гренландском и Баренцевом морях, где острова, архипелаги и стабильный ледовый покров служат препятствием для его дальнейшего распространения в Северном Ледовитом океане. Дополнительным источником поступления морского мусора в регион являются арктические реки [8]. В настоящий момент знания о путях переноса и трансформации микропластика между различными объектами окружающей среды (например, поверхностью воды, водной толщью, донными осадками и биотой) весьма ограничены, что не позволяет достоверно выполнять оценки экологических рисков для этих объектов. Таким образом, наряду с пятью глобальными районами накопления мусора в тропических круговоротах может формироваться шестой – в Арктических водах, в районе Баренцева моря [9]. Недавний анализ четырех ледяных кернов, собранных за Северным полярным кругом, показал высокое содержание микропластика в морском льду [10], что также может свидетельствовать об активном поступлении морского мусора в полярные широты.

Целью данной работы является оценка уровня загрязнения плавающим мусором Баренцева моря, включающая в себя получение новых данных об особенностях аккумуляции мусора на поверхности воды и обсуждение потенциальных источников его поступления и переноса. Кроме того, в работе сравниваются два метода определения плавающего мусора: с использованием планшета/смартфона и визуальный.

#### **Материалы и методы**

С 15 мая по 14 июня 2019 г. состоялась комплексная научно-исследовательская экспедиция на научно-экспедиционном судне «Михаил Сомов» в рамках

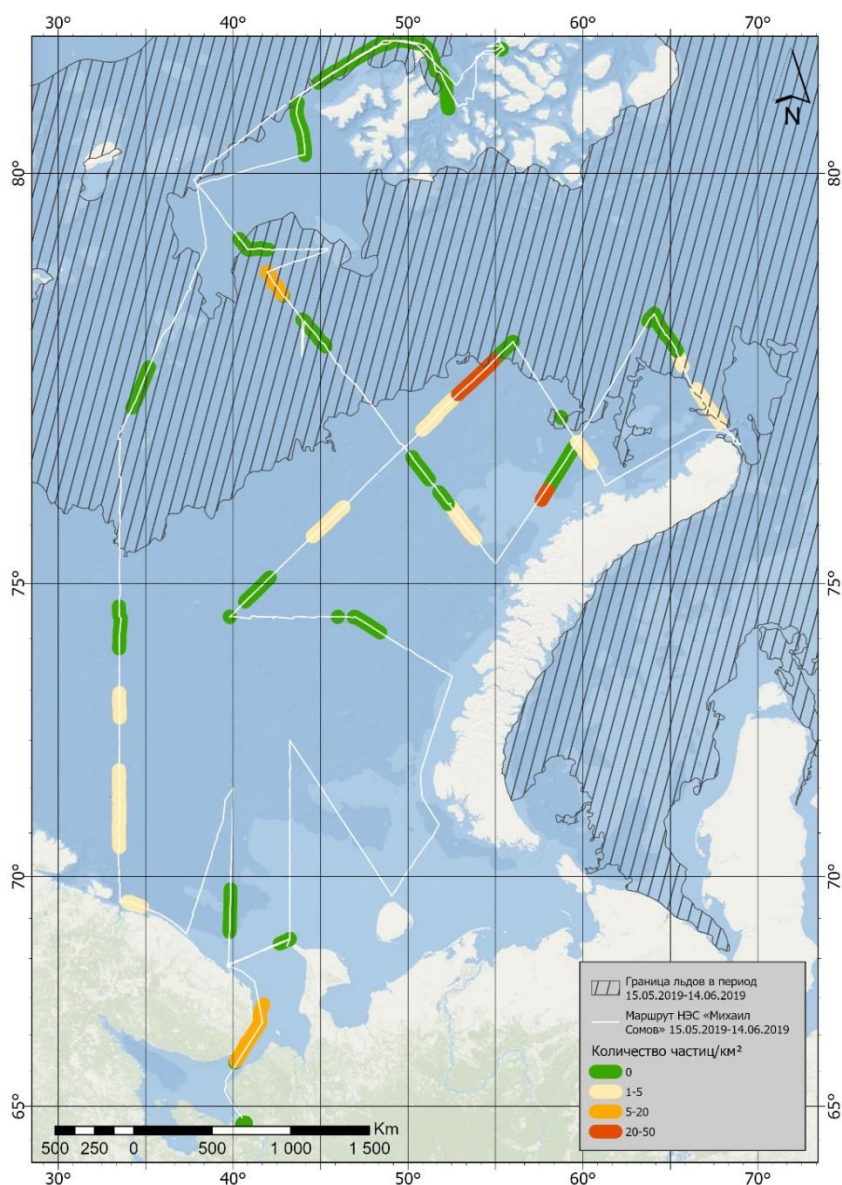
крупного национального проекта «ТРАНСАРКТИКА-2019, II ЭТАП». Маршрут экспедиции проходил из г. Архангельска через Белое море вдоль архипелага Новая Земля к архипелагу Земля Франца-Иосифа и обратно до г. Архангельска, покрывая в основном акваторию восточной части Баренцева моря. На борту судна по ходу экспедиции проводилось обследование загрязнения акватории моря плавающим морским мусором. Наблюдения выполнялись по ходу движения судна двумя разными способами специалистами Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова (ГОИН), Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук (ИПЭЭ РАН) и ФГБУ Северное «УГМС».

Для первого способа была выбрана методика института Joint Research Center (Объединенный научный центр, г. Испра, Италия) [11], которая была впервые использована в северных морях (далее «Метод 1»). При помощи мобильного приложения Floating Litter Monitoring (FLM), установленного на планшет на базе Android, фиксировалось наличие крупных частиц морского мусора на поверхности моря. Наблюдения проводились с палубы судна во время движения. Полоса учета морского мусора варьировала в зависимости от метода и условий наблюдения. Исходя из высоты наблюдателя над урезом воды и условий наблюдения, выбиралась ширина полосы учета (обычно около 15–30 м), в которой наблюдатель гарантированно различает объекты более 2,5 см согласно методике [3]. Приложение позволяет записывать трек учета с привязкой каждого объекта к GPS координатам и идентифицировать объекты морского мусора по установленным общепринятым категориям. При встрече больших скоплений мусора, фактах подтверждения источников поступления мусора или взаимодействия его с морской фауной производилась фотофиксация. Все встреченные объекты антропогенного мусора дополнительно отмечались в полевом дневнике, в который также записывались погодные условия, волнение, ледовая обстановка, видимость и прочая сопровождающая информация.

В качестве второго способа применялся простой визуальный метод учета плавающего мусора (далее «Метод 2»). Наблюдения проводились по обоим бортам судна при благоприятных погодных и световых условиях круглосуточно семью сменными наблюдателями (вахты по 2 наблюдателя по 4 часа) с пеленгаторной площадки, расположенной над ходовым мостиком. Высота площадки над уровнем моря 17,5 м. При сильном ветре или во время осадков наблюдения проводились с ходового мостика. В темное время суток и при плохих погодных условиях: туман, сильный снег, дождь, волнение моря более 6 по шкале Бофорта, наблюдения не проводились. Все встречаемые частицы мусора фиксировались в бумажном протоколе с привязкой каждого объекта к GPS координатам. Записывались погодные условия, волнение, ледовая обстановка, видимость и прочая сопровождающая информация. Наблюдения включали идентификацию категорий мусора по составу согласно методике [3].

Одной из задач этих исследований было тестирование новой европейской методики по мониторингу плавающего мусора с помощью приложения FLM в арктических водах. Приложение позволяет в автоматическом режиме записывать координаты встреченных объектов мониторинга и сопутствующие метаданные, не отвлекаясь на другое оборудование и записи в блокноте. Перечень морского мусора и классификация его по категориям, используемая в приложении, соответствует последним мировым стандартам [3], что способствует сбору унифицированных данных. Данные записываются в формате csv, который при необходимости может открываться стандартной программой Microsoft Office Excel для последующей обработки информации. В то же время

был отмечен и ряд сложностей, учет которых может позволить их избежать при последующих исследованиях. Например, для достоверного отображения полученных результатов следует обращать особое внимание на выбор в приложении ширины учетной трансекты, так как от этого напрямую зависит расчет плотности мусора на единицу площади. При дальнейшей экстраполяции результатов это может стать серьезной ошибкой. Наблюдался также ряд технических трудностей при передаче и обработке данных. Опыт этих работ поможет учитывать в дальнейшем возможные сложности. В целом на протяжении экспедиции приложение FLM работало без сбоев, показало себя легким и удобным в использовании при благоприятных погодных условиях.



**Рис. 1.** Загрязненность морским мусором в восточной части Баренцева моря на разрезах экспедиции НЭС «Михаил Сомов» 15.05–14.06.2019 г., зарегистрированных при помощи мобильного приложения FLM (количество частиц/км<sup>2</sup>). Средняя граница ледового покрова представлена согласно оперативным данным по ледовой обстановке [12]

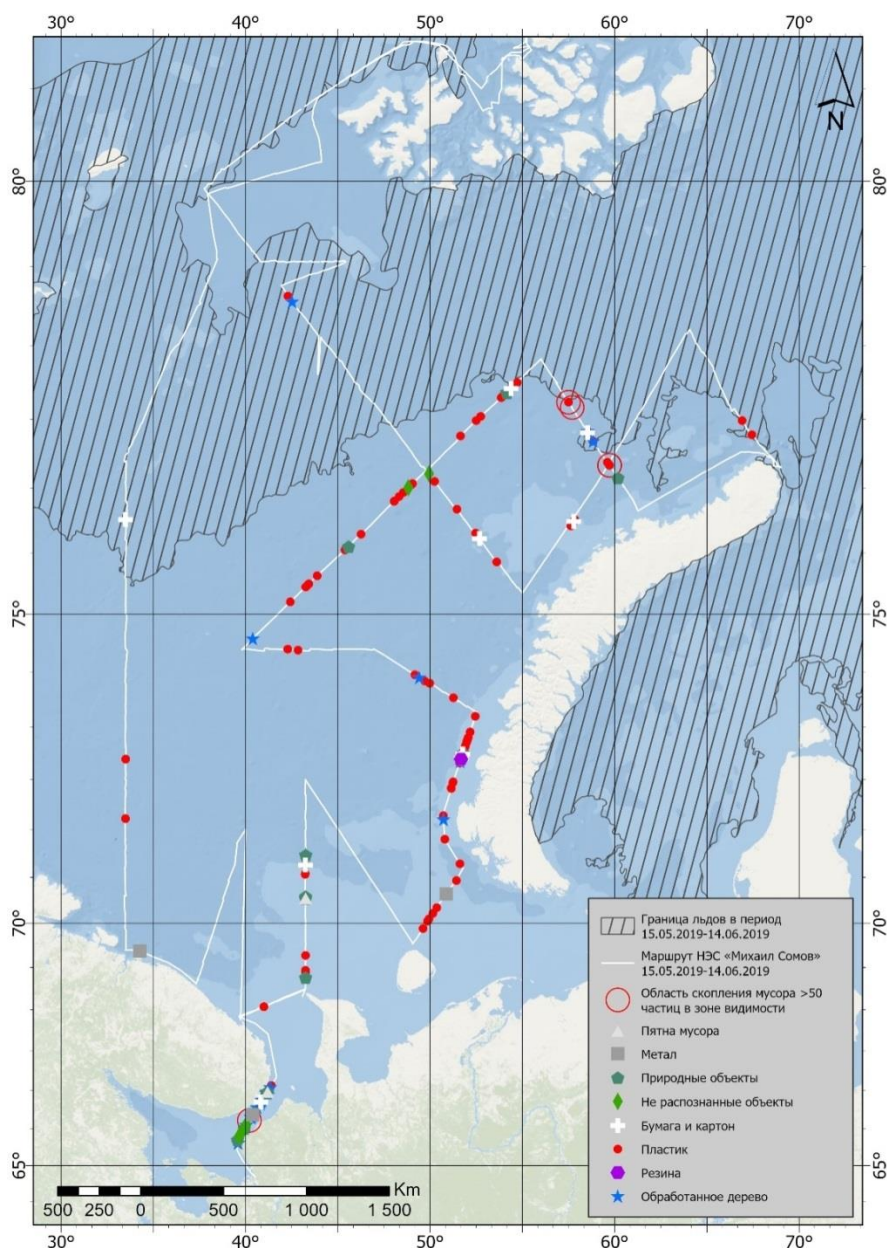
**Fig. 1.** Density of FMML in the eastern part of the Barents Sea during expedition on R/V «Mikhail Somov» 15.05–14.06.2019 on the transects registered with FLM mobile application (items/km<sup>2</sup>). Relevant ice cover [12]

### Результаты

Всего в экспедиции были проведены наблюдения вдоль трека судна длиной 5824 км методом 1 и длиной 8509 км методом 2. Плавающий морской мусор встречался в течение всей экспедиции. Плотность плавающего мусора на разрезах сильно варьировалась, наблюдались как обширные участки без мусора, так и значительные скопления мусора разного размера. Результаты выполненных исследований по оценке распределения плавающего морского мусора на акватории Баренцева моря представлены в графическом виде (рис. 1). Линиями разного цвета отображены разрезы, на которых проводился мониторинг, цветом показаны градации плотности мусора на разрезах.

Полученные данные показали, что большая часть разрезов была свободна от мусора, на 9 разрезах концентрация мусора была оценена в интервале от 1 до 5 частиц/км<sup>2</sup>, на 37 – от 5 до 20 и на 20 разрезах – от 20 до 50 частиц/км<sup>2</sup>. Наиболее значительные концентрации были отмечены в горле Белого моря и в открытых водах между северной частью арх. Новая Земля и Землей Франца-Иосифа. Средняя концентрация по собранным в приложении данным составила  $3,5 \pm 8,8$  частиц/км<sup>2</sup>.

Во время выполнения мониторинга Методом 2 большая часть мусора наблюдалась в восточной части маршрута исследований вдоль арх. Новая Земля (рис. 2).



**Рис. 2.** Скопления мусора и категории мусора по составу, зарегистрированные в ходе постоянных наблюдений по ходу движения судна во время простых визуальных наблюдений. Средняя граница ледового покрова представлена согласно оперативным данным по ледовой обстановке [12]

**Fig. 2.** Categories of FML by composition and accumulation zones recorded during simple visual observations along the vessel route. Relevant ice cover [12]

При встрече большого количества мусора отмечались зоны скопления без идентификации объектов (large litter accumulations). По отзывам наблюдателей, через подобные мусорные «пятна» судно могло идти несколько минут. Были зафиксированы мусорные скопления с высокой плотностью шириной до 250 м и длиной до 7 км. По визуальным оценкам в одном таком «пятне» могло содержаться более 100 частиц с расстоянием между частицами от нескольких см до сотен метров. Такие значительные области накопления мусора были отмечены в горле Белого моря и у северной части Новой Земли, что в целом совпадает с данными, полученными при помощи приложения.

Анализ состава встреченного мусора во время визуальных наблюдений показал, что большую часть, как и ожидалось, составляет пластик (65 и 67 %, Методом 1 и Методом 2, соответственно), далее по убыванию следуют обработанное дерево (12 и 2 %), бумага и картон (6, 4 %), не распознанные объекты и пятна мусора (по 3 %), металл (алюминиевые банки, 2, 1 %) и резина (2, 1 %); во время работы Методом 2 выделялся мусор, относящийся к рыболовству – веревки, буи, обрывки сетей – 11 % (рис. 3). Природные объекты (деревья, ветки, листья и пр.) составили 21 и 9 % соответственно и не учитывались как мусор обоими методами (nonlitter).

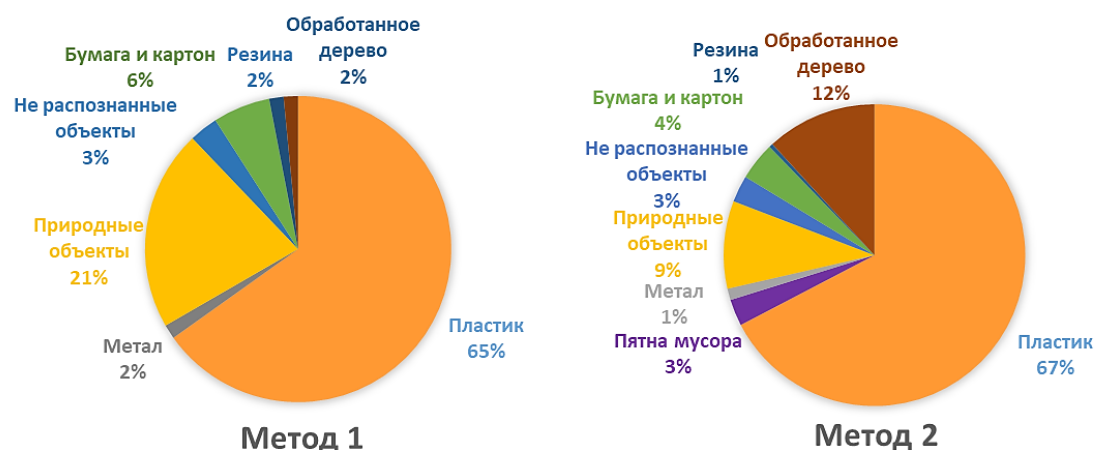


Рис. 3. Процентное соотношение по количеству встреченного морского мусора различного состава от суммарного, оцененное по Методу 1 и Методу 2

Fig. 3. Percentage ratio of the amount of encountered marine debris by composition from the total amount, estimated by Method 1 and Method 2

### Обсуждение

Сравнение полученных результатов с подобными исследованиями в других морях представляется затруднительным из-за разности использованных методов и единиц измерения. Для европейских морей в последнее время принято оценивать плотность плавающего встреченного морского мусора на квадратный километр (количество частиц/км<sup>2</sup>). Данные недавних исследований в северо-западной части Черного моря показывают среднюю плотность на исследованных разрезах 30,9 частиц/км<sup>2</sup> [13] (таблица), в то же время по данным проекта ЭМБЛАС-II средняя плотность морского мусора в различных регионах Черного моря оценивается в 90,5 частиц/км<sup>2</sup> [14].

В различных районах Средиземного моря была зарегистрирована средняя плотность от 10,9 [16] до 232 частиц/км<sup>2</sup> [16]. По данным из относительно мало загрязненных районов, например, в Южном океане, концентрация морского мусора соответствуют 0,003–6,0 частиц/км<sup>2</sup>.

Как указано выше, на основании модельных расчетов было установлено, что плавающий и подповерхностный пластик должен накапливаться в центрах океанских тропических круговоротов и в Баренцевом море [5]. Выполненные в тропических круговоротах полевые исследования подтверждают, что

количество плавающего мусора там значительно больше, чем в других районах и достигает максимальных значений по одним оценкам в 15222 частиц/км<sup>2</sup> [27], а по другим в 969777 частиц/км<sup>2</sup> [28]. Полученные нами оценки плотности плавающего морского мусора в Баренцевом море (в среднем от 1 до 50 частиц/км<sup>2</sup>), а также обнаруженные нами зоны скопления, где точную плотность подсчитать не удалось, свидетельствует о том, что загрязнение Баренцева моря вполне может быть сопоставимо с существующим на сегодняшний день загрязнением по крайней мере в южных морях Европы, а возможно, и в тропических круговоротах. Однако необходимы дополнительные исследования с применением стандартизованных методов, так как существующие в настоящее время оценки, полученные разными методами (таблица), сравнивать не вполне корректно.

За многовековую историю использования человеком океана и его ресурсов сложилось представление о его безграничных возможностях, в том числе и с точки зрения захоронения различных видов отходов. До сих пор повсеместно распространен выброс за борт бытовых отходов с судов, несмотря на принятые многочисленные международные и региональные законодательства в этой сфере. Проблема поступления пластикового мусора в арктические воды является новой и малоизученной, хотя становится все более

актуальной по мере его накопления в водах Мирового океана. Уже сейчас морской мусор представляет серьезную угрозу для морских организмов и их местобитаний. К этому можно добавить этические и экономические факторы в районах, где скопления морского мусора наносят существенный урон туристической индустрии.

**Таблица.** Концентрация плавающего морского мусора (единиц/км<sup>2</sup>) в различных районах Мирового океана

**Table.** FMML densities (items/km<sup>2</sup>) in different areas of the Ocean

Район/Region	Средняя концентрация Mean concentration	Максимальная концентрация Maximum concentration
	единиц/км <sup>2</sup>	(items/km <sup>2</sup> )
Черное море (Керченский пролив) Black Sea (Kerch Strait) [15]	66	–
Черное море (Северо-западная часть) Northeastern Black Sea [13]	30,9	–
Черное море (проект ЭМБЛАС-II) Black Sea (Project EMBLAS-II) [14]	90,5	800
Средиземное море Mediterranean Sea [16]	10,9–52	194,6
Средиземное море Mediterranean Sea [17]	232	1593
Северное море/North Sea [18]	2	1-6
Северное море/North Sea [19]	25–38	–
Чили/Chile [20]	10–50	250
Южно-Китайское море South China Sea [21]	4,9	16,9
Северная часть Тихого океана North Pacific [22]	459	–
Малаккский пролив Strait of Malacca [23]	579	–
Бенгальский залив Bay of Bengal [23]	8,8	–
Южный океан Southern Ocean [24]	0,0032–6	–
Британская Колумбия British Columbia [25]	1,48	2,3
Западная часть Гавайских островов West of Hawaii [26]	0,5	–
Северотихоокеанский круговорот North Pacific Gyre [27]	–	15222
Северотихоокеанский круговорот North Pacific Gyre [28]	334271	969777
Баренцево море (данная работа) Barents Sea (this work)	3,5	–

В данном исследовании представлены первые данные о загрязнении восточной части Баренцева моря плавающим морским мусором. Было обнаружено, что средняя плотность мусора на всех разрезах соответствует 3,5 частиц/км<sup>2</sup>. На некоторых участках маршрута судна были отмечены множественные значительные зоны скопления плавающего мусора, ранее не упоминавшиеся в научной литературе.

В результате проведенной экспедиции было протестировано приложение FLM для мониторинга плавающего морского мусора. Апробация в полевых условиях доказала удобство его использования для такого вида работ. Данное приложение может быть рекомендовано для последующих попутных наблюдений за плавающим морским мусором.

Сравнивая две методики, можно отметить, что второй вид мониторинга – с помощью бумажных протоколов – был более трудозатратным, менее технологичным, но в то же время и более надежным. Этот метод не позволил произвести сравнения по плотности мусора с предыдущим методом, а также с другими подобными исследованиями в других районах по причине отсутствия данных о длине и ширине треков, однако географический охват оказался намного шире, благодаря постоянным наблюдениям.

Несмотря на то, что Баренцево море представляется малонаселенным с практически отсутствующей промышленной и производственной деятельностью, наличие активного рыболовного промысла, добыча полезных ископаемых и, соответственно, активное судоходство создает существенную нагрузку на его экосистему, накладываясь на привнос морского мусора с морскими течениями из других районов Мирового океана [5]. В связи с потеплением климата в последние годы антропогенная нагрузка на экосистему Баренцева моря заметно увеличивается. Страны Арктического Союза формируют арктические войска и создают инфраструктуру для их обустройства, модернизируют вооружения в «полярном варианте», ускоренно строят новые корабли ледового класса, аэродромы и др. Получили заметное развитие и мирные виды морехозяйственной деятельности в бассейне Баренцева моря. Прежде всего, это развитие торгового флота, который использует незамерзающий порт Мурманск для транспортировки кузбасского угля, минеральных удобрений и многих других товаров на экспорт. Планируется дальнейшее увеличение объемов перевалки грузов в этом порту, планируются и строятся перегрузочные терминалы, соответствующая сухопутная транспортная система. В Мурманске находится база атомных ледоколов, которые уже используются для проводки российских и зарубежных судов по Северному морскому пути в восточные районы российской Арктики, где осуществляется модернизация и строительство нескольких портов, и далее – до Берингова пролива [29].

Относительно высокое содержание плавающего мусора в восточной части Баренцева моря может быть связано с несколькими причинами. Во-первых, это может быть перенос из загрязненных районов Атлантики течениями, что подтверждается и другими исследованиями [8, 9]. Во-вторых, значительным источником может служить сброс отходов с судов. Согласно Правилу 3 Приложения 5 Конвенции МАРПОЛ 73/78 [30], вне особых районов, к которым относится Баренцево море, разрешается сброс бытовых отходов в море за пределами 25-мильной зоны. В то же время Северный Морской Путь (СМП) имеет особые правила по обращению с отходами. Состав встреченного в данном исследовании морского мусора, представляющий в основном смесь бытовых отходов, позволяет предположить, что обширные скопления мусора в восточной части Баренцева моря у берегов Новой Земли могут быть связаны именно с законодательно разрешенным сбросом мусора в море перед входом в СМП, где это сделать, не нарушая правила, уже невозможно.

### Заклучение

В настоящее время наблюдается негативная тенденция накопления морского мусора в водах Мирового океана в целом и в отдельных его районах. Баренцево море потенциально может служить местом активного его накопления подобно другим пяти глобальным океаническим круговоротам [9]. Выполненные исследования подтвердили предположения о скоплениях плавающего морского мусора в восточной части Баренцева моря. По предварительным оценкам на некоторых отрезках пути экспедиции плотность морского мусора была сопоставима со средними значениями в существенно более загрязненных южных морях Европы. Для уточнения фактических значений плотности и подтверждения полученных предварительных результатов рекомендуется проведение подобных исследований повторно с детальным следованием общепринятым методикам для возможности достоверного сравнения результатов [3].

Чтобы уменьшить объемы поступления пластиковых отходов в Мировой океан потребуются принятие целого ряда законодательных и практических мер по сокращению производства изделий из пластика, повторного использования и утилизации такого вида отходов, что нуждается в более подробных качественных и количественных исследованиях [31]. Регулярные мониторинговые исследования могли бы помочь в определении основных источников поступления мусора, распространения и влияния его на морские организмы, спланировать необходимые действия по предотвращению дальнейшего загрязнения аква-

торий морским мусором. Подобные исследования должны выполняться по единым унифицированным методикам, таким как методики AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme), OSPAR (Oslo and Paris Conventions for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic), MSFD (Marine Strategy Framework Directive) для возможности сравнения полученных результатов и быть одной из частей комплексного мониторинга морского мусора, включающего также мониторинг берегового мусора и мусора, поступающего в моря с водами рек.

*Исследования были организованы в рамках комплексной научно-исследовательской экспедиции на НЭС «Михаил Сомов» ФГБУ «Северное УГМС», являющейся II этапом крупного национального проекта «ТРАНСАРКТИКА-2019». Комплексные экспедиционные исследования экосистем Баренцева моря были выполнены в соответствии со Стратегией развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года, а также выполнения программы работ на омывающих берега Российской Федерации морях в соответствии с Приказом Росгидромета № 84 от 26 февраля 2019 года о проведении экспедиции во исполнение Распоряжения Правительства РФ от 23 февраля 2019 года № 276. Также работы были проведены при поддержке проекта Норвежского Фонда Исследований № 13149 ЭСКИМО (ESCIMO) и № 288079 МАЛИНОР (MALINOR). Авторы статьи благодарят за помощь в сборе материала сотрудников ИПЭЭ РАН: кандидата биологических наук Ольгу Виленовну Шпак, Светлану Михайловну Артемьеву, Алексея Александровича Тимшина, и сотрудников ФГБУ Северное «УГМС» – кандидата биологических наук Игоря Юрьевича Попова, Юлию Андреевну Давыдову и Чукмасова Павла Викторовича.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kershaw P.J. Marine plastic debris and microplastics global lessons and research to inspire action and guide policy change. – Nairobi: UNEP, 2016. – 192 p.
2. Plastic waste inputs from land into the ocean / J.R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T.R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, K.L. Law // *Science*. American Association for the Advancement of Science. – 2015. – V. 347. – № 6223. – P. 768–771.
3. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas / F. Galgani, G. Hanke, S. Werner, L. Oosterbaan, P. Nilsson, D. Fleet, S. Kinsey, J. van Franeker, T. Vlachogianni, M. Scoullou, J. Mira Veiga, A. Palatinus, M. Matiddi, T. Maes, S. Korpinen, A. Budziak, H. Leslie, J. Gago, G. Liebez // *European Commission, Joint Research Centre. MSFD Technical Subgroup on Marine Litter (TG ML)*. – 2013. – № EUR 26113. – P. 1–126.
4. Ross N.L. The «plasticene» epoch? // *Elements*. Mineralogical Society of America. – 2018. – V. 14. – № 5. – P. 291–292.
5. Van Sebille E., England M.H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters // *Environmental Research Letters*. Institute of Physics Publishing. – 2012. – V. 7. – № 4. – P. 1–6.
6. On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation / T. Kuhlbrodt, A. Griesel, M. Montoya, A. Levermann, M. Hofmann, S. Rahmstorf // *Reviews of Geophysics*. – 2007. – V. 45. – № 2. – P. 2001–2002.
7. Rudels B. Arctic ocean circulation // *Encyclopedia of Ocean Sciences*. – 2019. – C. 262–277
8. Studies of microplastic distribution in subsurface waters of the Arctic Seas in the 73 cruise of RV «Akademik Mstislav Keldysh», September–October 2018 / E. Yakushev, S. Pakhomova, A.L. Lusher, A. Mazur, A. Grinko, T. Dautova, D. Kosmach, A. Berezina // *Geology of seas and oceans: Proc. of XXIII International Conference on Marine Geology*. – Moscow, Russia, 2019. – P. 326–330.
9. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation / A. Còzar, E. Martí, C.M. Duarte, J. García-de-Lomas, E. van Sebille, T.J. Ballatore, V.M. Eguiluz, J. Ignacio González-Gordillo, M.L. Pedrotti, F. Echevarría, R. Troublè, X. Irigoien // *Science Advances*. – 2017. – V. 3. – № 4. – P. 1–8.
10. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice / R.W. Obbard, S. Sadri, Y.Q. Wong, A.A. Khitun, I. Baker, R.C. Thompson // *Earth's Future*. American Geophysical Union (AGU). – 2014. – V. 2. – № 6. – P. 315–320.
11. González-Fernández D., Hanke G. Toward a harmonized approach for monitoring of riverine floating macro litter inputs to the marine environment // *Frontiers in Marine Science*. – 2017. – V. 4. – P. 1–7.
12. ФГБУ «ААНИИ» // Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. 2019. URL: <http://www.aari.ru> (дата обращения 18.07.2019).
13. First observations on the abundance and composition of floating debris in the North-western Black Sea / G. Suaria, M.C. Melinte-Dobrinescu, G. Ion, S. Aliani // *Marine Environmental Research*. – 2015. – V. 107. – P. 45–49.
14. National pilot monitoring studies and joint open sea surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, Final Scientific Report / J. Slobodnik, B. Alexandrov, V. Komorin, A. Mikaelyan, A. Guchmanidze, M. Arabidze, A. Korshenko, S. Moncheva. – 2017. – № February 2017. – 479 p.
15. Marine litter in the Black Sea region: a review of the problem. – Istanbul: Black Sea Commission Publications, 2007. – 160 p.
16. Suaria G., Aliani S. Floating debris in the Mediterranean Sea // *Marine Pollution Bulletin*. – 2014. – V. 86. – P. 494–504.
17. Abundance and composition of floating marine macro litter on the eastern sector of the Mediterranean Sea / E. Constantino,

- I. Martins, J.M. Salazar Sierra, F. Bessa // *Marine Pollution Bulletin*. – 2019. – V. 138. – № January 2019. – P. 260–265.
18. Herr H. Vorkommen von Schweinswalen (*Phocoena phocoena*) in Nord- und Ostsee – im Konflikt mit Schifffahrt und Fischerei? Thesis. – Hamburg, 2009. – 120 p.
19. Spatio-temporal distribution of floating objects in the German Bight (North Sea) / M. Thiel, I.A. Hinojosa, T. Joschko, L. Gutow // *Journal of Sea Research*. – 2011. – V. 65. – № 3. – P. 368–379.
20. Hinojosa I.A., Thiel M. Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile // *Marine Pollution Bulletin*. – 2009. – V. 58. – № 3. – P. 341–350.
21. The abundance, composition and sources of marine debris in coastal seawaters or beaches around the northern South China Sea (China) / P. Zhou, C. Huang, H. Fang, W. Cai, D. Li, X. Li, H. Yu // *Marine Pollution Bulletin*. – 2011. – V. 62. – № 9. – P. 1998–2007.
22. Titmus A.J., David Hyrenbach K. Habitat associations of floating debris and marine birds in the North East Pacific Ocean at coarse and meso spatial scales // *Marine Pollution Bulletin*. – 2011. – V. 62. – № 11. – P. 2496–2506.
23. Ryan P.G. A simple technique for counting marine debris at sea reveals steep litter gradients between the Straits of Malacca and the Bay of Bengal // *Marine Pollution Bulletin*. – 2013. – V. 69. – № 1–2. – P. 128–136.
24. Ryan P.G., Musker S., Rink A. Low densities of drifting litter in the African sector of the Southern Ocean // *Marine Pollution Bulletin*. – 2014. – V. 89. – № 1–2. – P. 16–19.
25. Williams R., Ashe E., O'Hara P.D. Marine mammals and debris in coastal waters of British Columbia, Canada // *Marine Pollution Bulletin*. – 2011. – V. 62. – № 6. – P. 1303–1316.
26. Matsumura S., Nasu K. Distribution of floating debris in the North Pacific Ocean: sighting surveys 1986–1991. – NY: Springer, 1997. – P. 15–24.
27. Titmus A.J., Hyrenbach D.K. Habitat associations of floating debris and marine birds in the North East Pacific Ocean at coarse and meso spatial scales // *Marine Pollution Bulletin*. – 2011. – V. 62. – № 11. – P. 2496–2506.
28. Moore C.J., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific Central Gyre // *Marine Pollution Bulletin*. – 2001. – № 42 (12). – P. 1297–1300.
29. Ivanova L., Sokolov K., Kharitonova G. Plastic pollution tendencies of the Barents Sea and adjacent waters under the climate change // *Arctic and North*. – 2018. – V. 32. – № 32. – P. 121–145.
30. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г. United Nations, 1997. – 26 с.
31. Black sea marine litter regional action plan. – Istanbul, Black Sea Commission Publications, 2018. – 30 p.

Поступила 13.01.2021 г.

#### Информация об авторах

**Погожева М.П.**, аспирант Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук; старший научный сотрудник Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова, Росгидромет.

**Якушев Е.В.**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук; старший научный сотрудник, Норвежский институт водных исследований.

**Терский П.Н.**, младший научный сотрудник Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова.

**Глазов Д.М.**, ведущий инженер Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук.

**Аляутдинов В.А.**, научный сотрудник Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова.

**Коршенко А.Н.**, кандидат биологических наук, заведующий отделом мониторинга морской среды Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова, Росгидромет.

**Ханке Г.**, доктор философии по химии (PhD), старший научный сотрудник Объединенного научного центра.

**Семилетов И.П.**, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

UDC 504.42(269.718):504.054

## ASSESSMENT OF BARENTS SEA FLOATING MARINE MACRO LITTER POLLUTION DURING THE VESSEL SURVEY IN 2019

**Maria P. Pogojeva**<sup>1,2</sup>,  
pogojeva\_maria@mail.ru

**Evgeniy V. Yakushev**<sup>1,3</sup>,  
evgeniy.yakushev@niva.no

**Petr N. Terskiy**<sup>2</sup>,  
peter.terskiy@gmail.com

**Dmitry M. Glazov**<sup>4</sup>,  
dglazov@yandex.ru

**Vadim A. Alyautdinov**<sup>2</sup>,  
vada.90@mail.ru

**Alexander N. Korshenko**<sup>2</sup>,  
korshenko58@mail.ru

**Georg Hanke**<sup>5</sup>,  
georg.hanke@ec.europa.eu

**Igor P. Semiletov**<sup>6</sup>,  
igorsm@poi.dvo.ru

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy avenue, Moscow, 117997, Russia.

<sup>2</sup> N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshhydromet,  
6, Kropotkinskiy lane, Moscow, 119034, Russia.

<sup>3</sup> Norwegian Institute of Water Research,  
Gaustadalleen 21, Oslo, 0345, Norway.

<sup>4</sup> A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of Russian Academy of Sciences,  
33, Leninsky avenue, Moscow, 119071, Russia.

<sup>5</sup> European Commission Joint Research Centre,  
Via Enrico Fermi 2749, I-21027 Ispra (VA).

<sup>6</sup> V.I. Ilyichov Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,  
43, Baltic street, Vladivostok, 690041, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the increasing accumulation of plastic debris in the marine environment, which has raised serious concerns in the scientific community as well as in the general public. Increasing litter concentrations have a growing impact on living organisms, the quality of marine waters and the ecosystem as a whole, often affecting living and health conditions of human beings as well. Taking into account the global water masses circulation, environmental conditions and constantly increasing anthropogenic pressure related to the global warming, the Arctic could potentially serve as a place for the permanent accumulation of plastic waste. Furthermore, the Arctic ecosystem, considered as pristine and fragile environment, could particularly suffer from increasing litter occurrence. The main objectives of this work were the acquisition of new data on the potential accumulation areas of floating marine macro litter (FMML) in the Barents Sea, an initial assessment of the level of pollution by FMML in the Arctic and an analysis of potential sources.

**Methods.** During the survey new methods for FMML monitoring were tested and combined with visual observations, a mobile application was used in order to simplify the harmonized collection of data.

The results of this study present the first data on pollution of the eastern part of the Barents Sea by FMML. It was found that the average density corresponds to 3,5 items/ km<sup>2</sup>. At some transects along the vessel route, numerous significant areas of accumulation of FMML were noted, which was not reported before in the scientific literature. Some practical recommendations were made in the conclusions to reduce the amount of litter entering the marine environment, and the need of regular monitoring studies was highlighted.

### Key words:

Marine pollution, marine floating macro litter, Arctic, Barents Sea, marine environmental monitoring.

The studies were organized within the framework of a comprehensive research expedition of the FSBI «Northern Directorate for Hydrometeorology and Environmental Monitoring» on the R/V Mikhail Somov, which was the II stage of the national project TRANSARCTICA-2019. The field studies of the ecosystems of the Barents Sea were carried out in accordance with the Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the period up to 2020, as well as the implementation of the work program on the Russian seas in accordance with the Order of Roshhydromet No. 84 dated February 26, 2019 on conducting an expedition in pursuance of the Order of the Government of the Russian Federation of February 23, 2019 No. 276. The work was also carried out with the support of the Norwegian Research Foundation project No. 13149 ESCIMO and No. 288079 MALINOR. The authors of the article thank the staff of the A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS Olga Shpak, Svetlana Artemieva, Aleksey Timshin and the staff of FSBI «Northern Directorate for Hydrometeorology and Environmental Monitoring» Igor Popov, Yulia Davydova and Pavel Chukmasov for their help in collecting the field data.

### REFERENCES

1. Kershaw P.J. *Marine plastic debris and microplastics global lessons and research to inspire action and guide policy change*. Nairobi, UNEP, 2016. 192 p.
2. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science. American Association for the Advancement of Science*, 2015, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771.



3. Galgani F., Hanke G., Werner S., Oosterbaan L., Nilsson P., Fleet D., Kinsey S., Van Franeker J., Vlachogianni T., Scoullou M., Mira Veiga J., Palatinus A., Matiddi M., Maes T., Korpinen S., Budziak A., Leslie H., Gago J., Liebez G. Guidance on monitoring of marine litter in European Seas. *European Commission, Joint Research Centre. MSFD Technical Subgroup on Marine Litter (TG ML)*, 2013, no. EUR 26113, pp. 1–126.
4. Ross N.L. The «plasticene» epoch? *Elements. Mineralogical Society of America*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 291–292.
5. Van Sebille E., England M.H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters, *Environmental Research Letters. Institute of Physics Publishing*, 2012, vol. 7, no. 4, pp. 1–6.
6. Kuhlbrodt T., Griesel A., Montoya M., Levermann A., Hofmann M., Rahmstorf S. On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation. *Reviews of Geophysics*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 2001–2002.
7. Rudels B. Arctic ocean circulation. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2019, pp. 262–277.
8. Yakushev E., Pakhomova S., Lusher A.L., Mazur A., Grinko A., Dautova T., Kosmach D., Berezina A. Studies of microplastic distribution in subsurface waters of the Arctic Seas in the 73 cruise of RV «Akademik Mstislav Keldysh», September–October 2018. *Geology of seas and oceans: Proc. of XXIII International Conference on Marine Geology*. Moscow, Russia, 2019, pp. 326–330.
9. Cózar A., Martí E., Duarte C.M., García-de-Lomas J., Van Sebille E., Ballatore T.J., Eguliz V.M., Ignacio González-Gordillo J., Pedrotti M.L., Echevarría F., Troublé R., Irigoien X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation. *Science Advances*, 2017, vol. 3, no. 4, pp. 1–8.
10. Obbard R.W., Sadri S., Wong Y.Q., Khitun A.A., Baker I., Thompson R.C. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future. American Geophysical Union (AGU)*, 2014, vol. 2, no. 6, pp. 315–320.
11. González-Fernández D., Hanke G. Toward a harmonized approach for monitoring of riverine floating macro litter inputs to the marine environment. *Frontiers in Marine Science*, 2017, vol. 4, pp. 1–7.
12. *State Research Center «Arctic and Antarctic Research Institute» (AARI)*, 2019. Available at: <http://www.aari.ru> (assessed 18 July 2019).
13. Suaria G., Melinte-Dobrinescu M.C., Ion G., Aliani S. First observations on the abundance and composition of floating debris in the North-western Black Sea. *Marine Environmental Research*, 2015, vol. 107, pp. 45–49.
14. Slobodnik J., Alexandrov B., Komorin V., Mikaelyan A., Guchmanidze A., Arabidze M., Korshenko A., Moncheva S. National pilot monitoring studies and joint open sea surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine. *Final Scientific Report*, 2017, February, 479 p.
15. *Marine litter in the Black Sea Region: A review of the problem*. Istanbul, Black Sea Commission Publications, 2007. 160 p.
16. Suaria G., Aliani S. Floating debris in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, vol. 86, pp. 494–504.
17. Constantino E., Martins I., Salazar Sierra J.M., Bessa F. Abundance and composition of floating marine macro litter on the eastern sector of the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, vol. 138, no. January 2019, pp. 260–265.
18. Herr H. *Vorkommen von Schweinswalen (Phocoena phocoena) in Nord- und Ostsee – im Konflikt mit Schifffahrt und Fischerei?* Thesis. Hamburg, 2009. 120 p.
19. Thiel M., Hinojosa I.A., Jorschko T., Gutow L. Spatio-temporal distribution of floating objects in the German Bight (North Sea). *Journal of Sea Research. Elsevier*, 2011, vol. 65, no. 3, pp. 368–379.
20. Hinojosa I.A., Thiel M. Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, vol. 58, no. 3, pp. 341–350.
21. Zhou P., Huang C., Fang H., Cai W., Li D., Li X., Yu H. The abundance, composition and sources of marine debris in coastal seawaters or beaches around the northern South China Sea (China). *Marine Pollution Bulletin*, 2011, vol. 62, no. 9, pp. 1998–2007.
22. Titmus A.J., Hyrenbach D.K. Habitat associations of floating debris and marine birds in the North East Pacific Ocean at coarse and meso spatial scales. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, vol. 62, no. 11, pp. 2496–2506.
23. Ryan P.G. A simple technique for counting marine debris at sea reveals steep litter gradients between the Straits of Malacca and the Bay of Bengal. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, vol. 69, no. 1–2, pp. 128–136.
24. Ryan P.G., Musker S., Rink A. Low densities of drifting litter in the African sector of the Southern Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, vol. 89, no. 1–2, pp. 16–19.
25. Williams R., Ashe E., O'Hara P.D. Marine mammals and debris in coastal waters of British Columbia, Canada. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, vol. 62, no. 6, pp. 1303–1316.
26. Matsumura S., Nasu K. *Distribution of floating debris in the North Pacific Ocean: sighting surveys 1986–1991*. NY, Springer, 1997. pp. 15–24.
27. Titmus A.J., David Hyrenbach K. Habitat associations of floating debris and marine birds in the North East Pacific Ocean at coarse and meso spatial scales. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, vol. 62, no. 11, pp. 2496–2506.
28. Moore C. J., Moore S. L., Leecaster M. K., Weisberg S.B. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, no. 42 (12), pp. 1297–1300.
29. Ivanova L., Sokolov K., Kharitonova G. Plastic pollution tendencies of the Barents Sea and adjacent waters under the climate change. *Arctic and North*, 2018, vol. 32, no. 32, pp. 121–145.
30. *Mezhdunarodnaya konvenciya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov 1973* [International Convention for Prevention of Pollution from Ships 1973]. United Nations, 1997. 26 p.
31. *Black Sea Marine Litter Regional Action Plan*. Istanbul, Black Sea Commission Publications, 2018. 30 p.

Received: 13 January 2021.

#### Information about the authors

**Maria P. Pogojeva**, postgraduate student, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences; senior scientist, N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet.

**Evgeniy V. Yakushev**, Dr. Sc., leading scientist, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences; senior research scientist, Norwegian Institute of Water Research.

**Petr N. Terskiy**, junior scientist, N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet.

**Dmitry M. Glazov**, principal engineer, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of Russian Academy of Sciences.

**Vadim A. Alyautdinov**, research scientist, N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet.

**Alexander N. Korshenko**, Cand. Sc., Head of the Marine Monitoring Department, N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet.

**Georg Hanke**, PhD, senior scientist, EC Joint Research Centre.

**Igor P. Semiletov**, Dr. Sc., Head of the Laboratory of Arctic Research, V.I. Ilyichov Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 662.7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦ ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Косторева Жанна Андреевна<sup>1</sup>,  
zhanna.kostoreva@yandex.ru

Малышев Дмитрий Юрьевич<sup>1</sup>,  
dmitry.mlv@gmail.com

Сыродой Семен Владимирович<sup>1</sup>,  
ssyrodoy@yandex.ru

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

**Актуальность.** Анализ прогнозов специалистов показывает, что рост потребления электроэнергии в мире до 2030 г. составит 2,4 %. На сегодняшний день вырабатываемая на тепловых электрических станциях энергия составляет 2/3 от общей вырабатываемой всеми источниками. Большинство этих ТЭС в качестве топлива используют уголь. Доля ТЭС, использующих это топливо, – 40 %. При сжигании угля происходит интенсивное выделение загрязняющих веществ, таких как NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub>, основные последствия которого: ухудшение состояния здоровья человека, смог, кислотные дожди, парниковый эффект и пыление. Одним из новых инновационных решений экологических проблем угольной энергетики может стать сжигание биомассы (отходы лесопиления и лесного хозяйства). По оценкам специалистов объем запасов древесины в России превышает 82·10<sup>9</sup> м<sup>3</sup> и составляет 25 % от мировых запасов. Отходы ее переработки составляют более 30·10<sup>6</sup> м<sup>3</sup> в год. Интерес к использованию древесной биомассы также обуславливается постоянно возрастающими требованиями по экологичности объектов теплоэнергетики.

**Цель:** экспериментальное установление зависимостей условий (минимальных температур) и характеристик (времен задержки) зажигания от вида древесной биомассы и её влагосодержания на примере четырех достаточно доступных и широко распространенных видов древесины (наиболее калорийной и поэтому перспективной для теплоэнергетики).

**Объект:** сухая и насыщенная влагой древесина четырех видов (кедр, лиственница, сосна и осина). Экспериментальные исследования проведены для древесных частиц с относительной влажностью: 5, 30 и 45 %.

**Метод:** экспериментальное определение с использованием высокоскоростной видеокамеры Photron FASTCAM CA4 временных характеристик процессов зажигания частиц древесины в условиях, соответствующих по интенсивности нагрева камерам сгорания паровых и водогрейных котлов; регистрация температуры среды с использованием хромель-алюмелевых термопар.

**Результаты.** Приведены выполненные с целью обоснования ресурсоэффективности использования в теплоэнергетике древесной биомассы (как базового топлива паровых и водогрейных котлов) результаты экспериментальных исследований процессов зажигания сухих и влажных частиц четырех видов древесной биомассы в среде нагретого до высоких температур воздуха. Установлено существенное влияние вида древесины на условия и характеристики зажигания её одиночных частиц. Также установлено значительное влияние влажности на времена задержки зажигания частиц исследованных видов биомассы. Такие времена, соответствующие древесине в естественном состоянии, в 3–4 раза превышают во всем (достаточно широком) диапазоне изменения значимых для практики температур времена задержки зажигания сухих частиц древесины. Установленные в проведенных экспериментах закономерности иллюстрируют перспективность использования в теплоэнергетике древесной биомассы как основного топлива или компоненты древесно-угольной смеси.

### Ключевые слова:

Влажная древесина, биомасса, зажигание, время задержки зажигания, термическая подготовка топлива, эксперимент, энергоэффективность.

### Введение

Одним из основных признаков ресурсоэффективного промышленного производства является использование возобновляемых источников энергии [1]. По этой причине три последние десятилетия усилия ученых и инженеров всех развитых государств направлены на разработку научных основ использования возобновляемых в классической интерпретации этого термина (солнце, ветер, биомасса, геотермальная энергия) источников энергии (ВИЭ) [2]. Но, несмотря на многомиллиардные затраты на исследования и разработки в этой области науки, пока не достигнуты планировавшиеся в конце XX в. объемы выработки электрической энергии к 2020 г. в результате работы ВИЭ [3, 4]. Более того, в последние годы отчетливо

проявляется тенденция изменения содержания определения «возобновляемые источники энергии» во многих европейских государствах. К ВИЭ стали относить не только гидроэлектростанции, но даже атомные электрические станции, возможно, с целью формального увеличения доли возобновляемых источников в общем объеме выработки электрической энергии [5, 6].

Такое состояние работ по ВИЭ обусловлено, очевидно, объективными трудностями создания устойчивых (не зависящих в первую очередь от времени года, суток и погоды) установок и аппаратов для выработки электрической энергии при использовании ветра и солнечного излучения [7, 8]. По этим причинам самым надежным и устойчивым к временным

воздействиям разного рода источником энергии (возобновляемым без больших проблем) является биомасса [9]. При этом самым ресурсоэффективным и экологически значимым вариантом использования биомассы, скорее всего, является её прямое сжигание в топках паровых и водогрейных котлов большой (тепловые электрические станции) и малой (котельные и локальные системы теплоснабжения) энергетики [10]. Переработка биомассы в жидкое или газообразное топливо сопряжена с большими затратами энергии [11] и, как показали результаты многочисленных исследований (например, [12, 13]) в течение трех последних десятилетий, не является ресурсоэффективной в прямом смысле этого слова технологией.

Но и технология прямого сжигания биомассы в топках паровых и водогрейных котлов тоже достаточно сложная задача, решение которой в общем виде пока не получено – доля котельного оборудования с топливом биомассой составляет в России менее 1 % (в других государствах аналогично). Такое состояние дел во многом обусловлено тем, что любая биомасса (в том числе наиболее привлекательная для теплоэнергетики – древесина) в своем обычном состоянии является влагонасыщенной [14]. Предварительное же удаление влаги, например, из измельченной древесины, достаточно энергоемкий процесс. Кроме того, для влагоудаления необходимо определенное время.

Избыточная же влага (характерная для естественного состояния биомассы) существенно замедляет процесс зажигания частиц биомассы и увеличивает время их пребывания в топочной камере (или предтопке). Соответственно, увеличиваются затраты энергии и времени на влагоудаление, а зажигание затягивается. При этом недостаточно изучены пока закономерности зажигания частиц биомассы для того, чтобы ответить на вопрос о том, как влияет вид биомассы на условия и характеристики зажигания её частиц. В этой связи на основании анализа литературы по исследованию процессов, протекающих при использовании биомассы в энергетике [15, 16], можно сформулировать проблему – отсутствие объективной информации о функциональных связях характеристик зажигания биомассы (в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов), содержания влаги и вида биомассы.

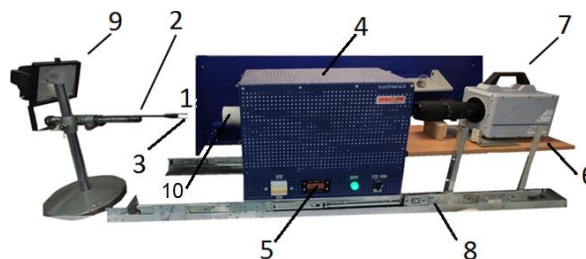
Для решения этой проблемы теоретическая база пока недостаточно полная. К настоящему времени разработаны физические (например, [17, 18]) и математические (например, [19]) модели испарения жидкостей с поверхности капель в высокотемпературных газовых средах и методы решения соответствующих краевых задач [19, 20]. Но теория [17–20] не применима к описанию процессов выхода влаги из пористой структуры влагонасыщенной древесины, даже в случае частиц малых размеров. Выход влаги из древесины в последнем случае зависит не только от температуры поверхности испарения и концентрации паров вблизи этой поверхности [20]. Важным параметром, определяющим скорость влагоудаления, является проницаемость древесины, которая зависит от вида древесины и её возраста и во многих случаях не из-

вестна. В этой связи теоретическое прогнозирование условий и характеристик зажигания частиц влажной древесины с использованием, например, моделей [21–23] часто невозможно.

#### Методика экспериментальных исследований

Очевидно, что сжигание любой биомассы (в том числе и древесной) тем более эффективно, чем меньше характерный размер отдельной топливной частицы [24]. Так, например, установлено экспериментально [25] и теоретически [26], что время задержки зажигания частиц углей, капель водоугольного топлива [27] и частиц древесины [21] прямо пропорционально характерному размеру частицы или капли топлива. Поэтому целесообразны эксперименты с частицами древесины малых размеров (единицы миллиметров).

Экспериментальные исследования влияния вида древесины и влажности её частиц на характеристики воспламенения проводились на экспериментальном стенде, который по своим методам измерения и обработки результатов соответствует экспериментальной установке, приведенной в [23, 24, 28, 29].



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – частица древесины; 2 – держатель частицы; 3 – металлическая игла; 4 – высокотемпературная печь; 5 – экран; 6 – подвижная платформа; 7 – высокоскоростная видеокамера; 8 – платформа для передвижения подвижной площадки; 9 – прожектор; 10 – керамический цилиндр

**Fig. 1.** Experimental stand: 1 – wood chips; 2 – particle holder; 3 – metal needle; 4 – high-temperature furnace; 5 – screen; 6 – movable platform; 7 – high-speed video camera; 8 – platform for moving the movable platform; 9 – searchlight; 10 – ceramic cylinder

Для каждой температуры внешней среды и одного вида древесины одной влажности количество опытов могло варьироваться, но для достижения необходимой точности определения времени задержки зажигания (t<sub>ign</sub>) было не менее 15. Обработка результатов проводилась методом наименьших квадратов. Систематические погрешности составляли не более 1 %, случайные – менее 10 %.

В экспериментах использовались частицы древесины в форме куба с характерным размером 4 мм, вырезанные из большого монолитного фрагмента сухой древесины с помощью лазерного резака. Наиболее эффективно сжигание в топках котельных агрегатов любого вида древесины в измельченном до минимально возможных характерных размеров одиночных частиц состоянии. Но такое измельчение очень

энергозатратный процесс, и важны оценки условий зажигания (а также и полного сгорания) максимально больших по размерам частиц древесины. Времена задержки зажигания частиц любых конденсированных веществ линейно зависит от их характерного размера [21]. Поэтому, зная эти времена для частиц двух размеров, можно интерполяцией (или, если есть необходимость, экстраполяцией) определить  $t_{ign}(T)$  частиц древесной биомассы для других характерных размеров.

При этом необходимо учитывать, что, как показали проведенные эксперименты, чем больше размер частицы, тем меньше погрешности в определении характеристик процесса их зажигания.

Погрешности определения размеров частиц составляли не более 0,2 мм. Использувавшиеся в экспериментах виды древесины: кедр, лиственница, сосна и осина. Влажность сухих образцов составляла – 6–7 % (соответствует влажности пиломатериалов при хранении), влажность специально подготовленных (увлажненных) образцов – 40–42 % (соответствует естественной влажности свежесрубленного дерева).

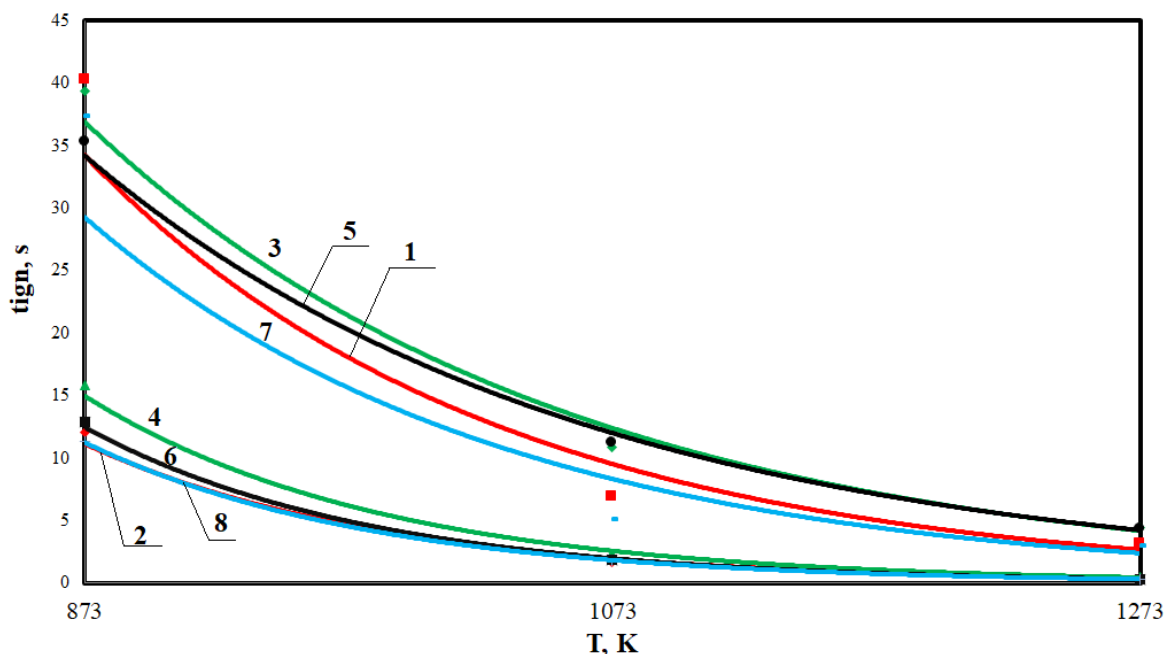
Также следует пояснить, что выбор исследуемых пород древесины обусловлен не только высокой вероятностью их масштабного использования в энергетике (сосна и осина). Кедр и лиственница, конечно, не являются энергетическим сырьем по целому ряду объективных причин, но их структура существенно отличается от структуры перспективных видов древесины и эксперименты с этими породами древесины целесообразны как основа для объективного анализа и обобщения.

### Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 представлены результаты экспериментов в виде традиционной для теории зажигания конденсированных веществ форме – зависимости времен задержки зажигания от температуры среды.

Анализ зависимостей  $t_{ign}(T)$  (рис. 2.) показывает, что вид древесины может оказывать значимое (до 25 %) влияние на характеристики и условия воспламенения её частиц при относительно умеренных температурах среды. Так, статистический анализ по непараметрическому критерию Вилкоксона–Манна–Уитни [30] показывает, что времена задержки зажигания частиц древесины на основе лиственницы отличаются значительно от значений  $t_{ign}(T)$  сосны, кедра и осины. При этом такой же статистический сравнительный анализ значений  $t_{ign}(T)$  частиц кедра и осины показывает, что при критерии значимости  $\mathcal{C}=0,01$  в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T \sim 873$  K) времена задержки зажигания этих двух видов древесины отличаются статистически незначительно.

Приведенные на рис. 2 результаты экспериментов показывают, что естественное влагосодержание пористой структуры любой древесины (из четырёх исследованных) приводит к росту в 3–4 раза времён задержки зажигания по сравнению с сухой древесиной. Такое большое увеличение  $t_{ign}$  характерно для всего диапазона (возможного в топочных условиях) изменения температур внешней, по отношению к частице биомассы, среды (даже при  $T \sim 1273$  K).



**Рис. 2.** Зависимости времен задержки зажигания древесных частиц от температуры внешней среды: 1 – насыщенная влагой частица кедра; 2 – сухая частица кедра; 3 – насыщенная влагой частица лиственницы; 4 – сухая частица лиственницы; 5 – насыщенная влагой частица сосны; 6 – сухая частица сосны; 7 – насыщенная влагой частица осины; 8 – сухая частица осины

**Fig. 2.** Dependences of the ignition delay times of wood particles on the ambient temperature: 1 – moisture-saturated cedar particle; 2 – dry cedar particle; 3 – moisture-impregnated larch particle; 4 – dry larch particle; 5 – moisture-saturated pine particle; 6 – dry pine particle; 7 – moisture-saturated aspen particle; 8 – dry aspen particle

Влияние влаги, насыщающей пористую структуру древесины в её естественном состоянии, на численные значения времен задержки зажигания достаточно очевидно, но не очевидна степень этого влияния. Объяснить приведенные на рис. 2 увеличение в 3–4 раза значения  $t_{ign}$  при увлажнении древесины можно тем, что процесс выхода паров воды из пористой структуры древесины приводит к образованию вокруг частицы слоя паров, температура которых существенно ниже температуры горячего воздуха, окружающего частицу. В результате этого резко снижается температура в каждой точке частицы, тепловой поток к поверхности

частицы и градиент концентрации паров воды вблизи поверхности испарения (от которого линейно зависит скорость этого фазового перехода). Можно сказать, что слой водяных паров вокруг древесины защищает её от нагрева и последующего зажигания.

Следует также отметить, что в экспериментах установлены предельные условия зажигания влажных частиц древесины. При температуре окружающей среды  $T < 873$  К времена задержки зажигания насыщенных влагой частиц превышали 60 секунд, а сухой – более 35 секунд (рис. 3). Очевидно, что такие большие  $t_{ign}$  неприемлемы на практике.

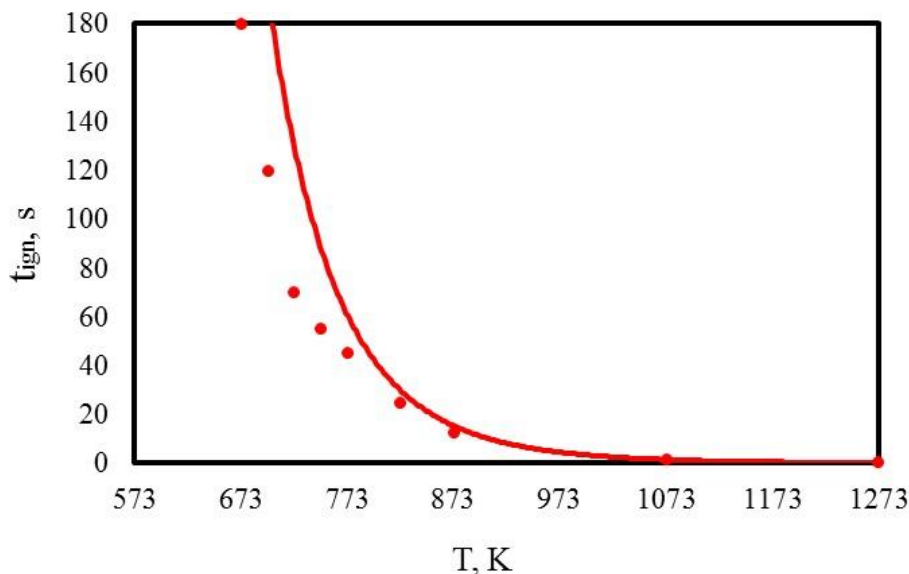


Рис. 3. Зависимость времен задержки зажигания сухих древесных частиц осины от температуры внешней среды  
 Fig. 3. Dependence of the ignition delay time of dry aspen wood particles on the ambient temperature

**Таблица.** Аппроксимационные выражения для кривых  $t_{ign}(T)$

	насыщенная влагой частица moisture-saturated particle		сухая частица dry particle	
	$t_{ign}$			
Кедр Cedar	$9096,2 \cdot e^{-0,006T}$		$23206 \cdot e^{-0,009T}$	
Лиственница Larch	$4324,9 \cdot e^{-0,005T}$		$33519 \cdot e^{-0,009T}$	
Сосна Pine	$3308 \cdot e^{-0,005T}$		$40390 \cdot e^{-0,009T}$	
Осина Aspen	$32274 \cdot e^{-0,009T}$		$7070,1 \cdot e^{-0,006T}$	

На рис. 4. приведены типичные кадры видеogramм экспериментов, на которых хорошо видны все основные стадии процесса как инертного нагрева частиц исследуемых видов древесины, так и непосредственно их зажигания. Третьи кадры каждого ряда соответствуют моменту появления пламени на поверхности частиц (как правило, это угловые точки).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в реальной практике сжигания древесины в топках паровых и водогрейных котлов необходимо минимизировать содержание влаги в биомассе до допустимых предельных значений концентраций. Это можно делать на стадии топливопод-

готовки в результате использования тепла отводимых топочных газов. В этой связи становится актуальной задача определения оптимальной по группе основных критериев (затраты энергии на измельчение древесины и её сушку, пожаробезопасности процесса топливоподготовки, экономической эффективности использования древесины как топлива в теплоэнергетике) технологии сжигания влажной на стадии топливоподготовки древесины.

Также проведены эксперименты с целью установления зависимости времен задержки зажигания исследуемых видов древесины от начальной влажности частиц. Результаты экспериментов приведены на рис. 5.

$$\varphi = \frac{m_k - m_0}{m_k} \cdot 100 \%,$$

$m_k$  – масса насыщенной влагой частица;  $m_0$  – начальная масса частицы.

Анализ экспериментальных зависимостей  $t_{ign}(\varphi)$  (рис. 5) показывает, что увеличение влажности древесины в диапазоне от 10 до 45 % приводит к росту времен задержки зажигания для частиц осины почти в 4 раза, а для частиц сосны почти в 5 раз. Можно сделать обоснованный вывод, что сушка древесины на стадии топливоподготовки является эффективным инструментом повышения эффективности технологий топливосжигания древесной биомассы на тепловых электростанциях.

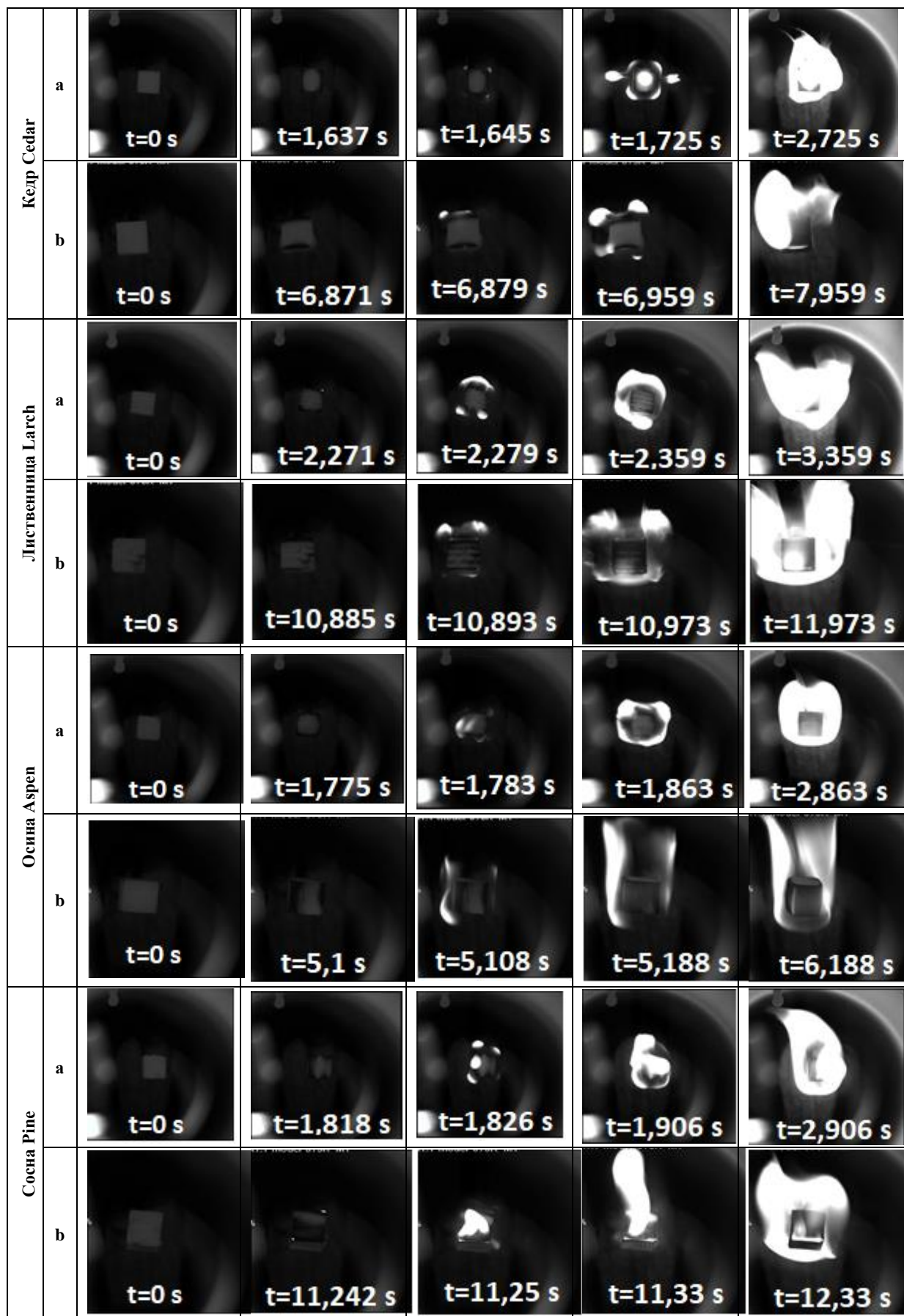
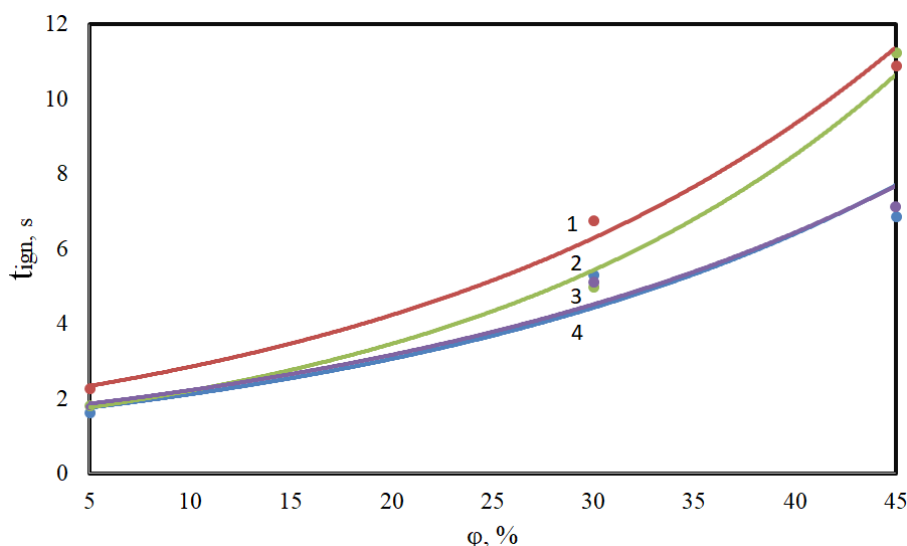


Рис. 4. Типичные кадры процесса воспламенения частицы древесины при  $T=1073$  К: а) сухая; б) насыщенная влагой  
 Fig. 4. Typical video recording of the ignition of a wood particle at  $T=1073$  K: a) dry; b) moisture-saturated



**Рис. 5.** Зависимость времен задержки зажигания древесных частиц от их относительной влажности  $\phi$  при температуре внешней среды  $T=1073$  К: 1 – лиственница; 2 – сосна; 3 – осина; 4 – кедр

**Fig. 5.** Dependence of the ignition delay time of wood particles on their relative humidity  $\phi$  at ambient temperature  $T=1073$  К: 1 – larch; 2 – pine; 3 – aspen; 4 – cedar

Также приведенные на рис. 5 результаты экспериментов дают основание для вывода о сильном влиянии структуры древесины на характеристики ее зажигания во влажном состоянии. Пример лиственницы, которая вследствие своей прочности и высокой плотности является уникальной породой древесины для строительства деревянных домов на многие десятилетия, показывает, что характеристики ее зажигания ( $t_{ign}$ ) в сухом состоянии незначительно отличаются от времен задержки зажигания древесины двух других хвойных пород (кедра и сосны) – отличия  $t_{ign}$  составляют около 0,5 с. Во влажном же состоянии высокая плотность лиственницы (и, соответственно, низкая проницаемость) приводит к тому, что  $t_{ign}$  лиственницы превышает при  $T=1073$  К время задержки зажигания сосны на 4 секунды. Этот результат дает основание для вывода о том, что на интенсивность процесса влагоудаления из частицы древесины влияет не только температура среды, но, в значительной степени, и условия выхода паров воды из пористой структуры древесины.

Анализ установленных в проведенных экспериментах закономерностей позволяет сделать заключение и о том, что даже при относительной влажности частиц древесины 25 % их времена задержки зажигания в 3–4 раза меньше аналогичных характеристик водоугольных топлив [28] идентичных размеров. Установлено, что совместное сжигание измельченных углей и древесины приводит к существенному снижению концентрации антропогенных выбросов ( $NO_x$  и  $SO_x$ ) в газообразных продуктах сжигания древесно-угольных смесей [31] уже при концентрации древесной биомассы 10–15 %. Поэтому при сжигании даже относительно крупных частиц древесины в смеси с углем возможно достижение низких концентраций антропогенных оксидов в дымовых газах в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов при малых временах задержки зажигания.

Кроме того, известно [29], что при нагреве смеси измельченных частиц угля и древесины первыми начинают гореть частицы более мелких фракций (такими чаще всего являются в реальных условиях угольные), которые инициируют в дальнейшем зажигание более крупных частиц древесной биомассы. Соответственно нет необходимости кардинально изменять конструкцию топки при переходе от сжигания угля на древесно-угольную смесь, как, например, при переходе на водоугольное топливо. В последнем случае необходимо использовать или специальный предтопок, или организовать циркуляционное движение капель водоугольного топлива в большой по размерам (по сравнению с предназначенной для сжигания углей) топке.

#### Заключение

На основании анализа результатов выполненных экспериментальных исследований можно сделать вывод о существенном влиянии вида древесной биомассы на условия и характеристики зажигания её частиц в высокотемпературной газовой среде. Чем больше влажность, тем значительнее влияние вида древесины на времена задержки зажигания частиц. При этом времена задержки зажигания всех четырех исследованных достаточно типичных видов древесины, которые могут использоваться в энергетике, в естественном (влажном) состоянии в 3–4 раза выше аналогичных времен сухой древесины.

Результаты проведенных экспериментов также показывают, что сжигание древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов может повысить существенно ресурсоэффективность теплоэнергетики при реализации комплекса мероприятий по контролю влагосодержания древесины и удалению избыточной влаги (в случае необходимости) на стадии топливоподготовки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10015).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system / N. Aste, P. Caputo, C. del Pero, G. Ferla, H. Enrique, H. Cardenas, F. Leonforte, A. Miglioli // *Energy*. – 2020. – V. 206. – 11809.
2. Data supporting the forecast of electricity generation capacity from non-conventional renewable energy sources in Colombia / A. Sagastume Gutiérrez, M. Balbis Morejóna, J. José Cabello Eras, M. Cabello Ulloa, F. Javier Rey Martínez, J. Gabriel Rueda-Bayona // *Data in Brief*. – 2020. – V. 28. – 104949.
3. Goodarzi Sh., Niles Perera H., Bunn D. The impact of renewable energy forecast errors on imbalance volumes and electricity spot prices // *Energy Policy*. – 2019. – V. 134. – 110827.
4. Coester A., Hofkes M.W., Papyrakis E. Economics of renewable energy expansion and security of supply: A dynamic simulation of the German electricity market // *Applied Energy*. – 2018. – V. 231. – P. 1268–1284.
5. Total primary energy supply (TPES) by source // Germany 1990–2018. URL: <https://www.iea.org/countries/germany> (дата обращения: 15.10.2020).
6. Renewable energy prospects: Germany. URL: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_REmap\\_Germany\\_report\\_2015-\(1\).pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Germany_report_2015-(1).pdf) (дата обращения: 15.10.2020).
7. Galvan E., Mandal P., Sang Y. Networked microgrids with rooftop solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2020. – V. 123. – 106239.
8. David A. Wood. Hourly-averaged solar plus wind power generation for Germany 2016: Long-term prediction, short-term forecasting, data mining and outlier analysis // *Sustainable Cities and Society*. – 2020. – V. 60. – 102227.
9. Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: an assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy / Mukesh Kumar Awasthi, Surendra Sarsaiya, Anil Patel, Ankita Juneja, Rajendra Prasad Singh, Binghua Yan, Sanjeev Kumar Awasthi, Archana Jain, Tao Liu, Yumin Duan, Ashok Pandey, Zengqiang Zhang, Mohammad J. Taherzadeh // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – V. 127. – 109876.
10. The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia / A. Sagastume Gutiérrez, J.J. Cabello Eras, L. Hens, C. Vandecasteele // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – V. 269. – 122317.
11. Markel E., Sims Ch., Burton C. English policy uncertainty and the optimal investment decisions of second-generation biofuel producers // *Energy Economics*. – 2018. – V. 76. – P. 89–100.
12. Catalán-Martínez D., Domínguez M.E., Serra J.M. Liquid fuels from biomass: An energy self-sustained process integrating H<sub>2</sub> recovery and liquid refining // *Fuel*. – 2018. – V. 212. – P. 353–363.
13. Hydrothermal liquefaction of biomass to fuels and value-added chemicals: products applications and challenges to develop large-scale operations / Ramon Filipe Beims, Yulin Hu, Hengfu Shui, Chunbao (Charles) Xu // *Biomass and Bioenergy*. – 2020. – V. 135. – 105510.
14. Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying / Zhengbin He, Jing Qian, Lijie Qu, Zhenyu Wang, Songlin Yi // *Results in Physics*. – 2019. – V. 12. – P. 1299–1303.
15. Effects of hemicellulose, cellulose and lignin on the ignition behaviors of biomass in a drop tube furnace / Shusen Wang, Chun Zou, Chun Lou, Haiping Yang, Mei Mei, Huixiang Jing, Sizhe Cheng // *Bioresour. Technol.* – 2020. – V. 310. – 123456.
16. Ignition and combustion of single pulverized biomass and coal particles in N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> environments / Sheng Qi, Zhihua Wang, Mário Costa, Yong He, Kefa Cen // *Fuel*. – 2021. – V. 283. – 118956.
17. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases // *Technical Physics*. – 2014. – V. 59 (7). – P. 959–967.
18. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high-temperature gases // *Technical Physics Letters*. – 2014. – V. 40 (6). – P. 499–502.
19. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование влияния конвекции в смеси продуктов сгорания на интегральные характеристики испарения движущейся капли тонкораспыленной воды // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87 (1). – С. 98–106.
20. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках // *Новосибирский государственный технический университет*. – 2009. – № 282. – С. 282.
21. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of itsignition in the high-temperature medium // *Renewable Energy*. – 2020. – V. 145. – P. 1474–1486.
22. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Испарение капель воды в высокотемпературной газовой среде // *Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси*. – 2019. – № 89 (1). – С. 133–142.
23. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva, A.A. Kostoreva, Zh.A. Kostoreva // *Fuel*. – 2019. – V. 252. – P. 19–36.
24. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, D.Yu. Malyshev, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // *Ignition stage. Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 170. – 115034.
25. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 106. – P. 561–569.
26. Mathematical and physical modeling of the coal-water coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // *Energy Reports*. – 2020. – V. 6. – P. 628–643.
27. Conditions of the water–coal fuel drop dispersion at their ignition in the conditions of high temperature heating / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Combustion science and technology*. – 2019. – V. 191. – P. 2162–2184.
28. Малышев Д.Ю., Сыродой С.В., Косторева Ж.А. Совместное зажигание водоугольной суспензии и древесной биомассы // *Промышленная энергетика*. – 2020. – № 5. – С. 44–49.
29. Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces / S.V. Syrodoy, J.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, L.I. Asadullina // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93 (2). – P. 443–449.
30. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1947. – № 18. – P. 50–60.
31. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood / G.V. Kuznetsov, S.A. Yankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov, I.V. Cherednik // *Energy*. – 2020. – V. 194. – 116896.

Поступила 26.10.2020 г.

## Информация об авторах

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

**Малышев Д.Ю.**, аспирант Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Сыродой С.В.**, кандидат технических наук, научный сотрудник Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 662.7

## DEFINITION OF WET WOOD PARTICLES IGNITION CONDITIONS AND CHARACTERISTICS TO INCREASE THE RESOURCE EFFICIENCY OF HEAT POWER ENGINEERING

Zhanna A. Kostoreva<sup>1</sup>,  
zhanna.kostoreva@yandex.ru

Dmitry Yu. Malyshev<sup>1</sup>,  
dmitry.mlv@gmail.com

Semen V. Syrodoy<sup>1</sup>,  
ssyrodoy@yandex.ru

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

**The relevance.** Analysis of experts' forecasts shows that the growth in global electricity consumption until 2030 will be 2,4 %. Today, the energy generated at thermal power plants is 2/3 of the total energy generated by all sources. For most thermal power plants, coal is the main fuel. The share of thermal power plants burning coal reaches 40 %. Burning coal leads to intense emissions of nitrogen oxides and sulfur, the main consequences of which are deterioration in human health, smog and acid rain. One of the new solutions to the environmental problems of the energy industry is the combustion of biomass (sawmill and forestry waste). According to experts, the volume of timber reserves in Russia exceeds  $82 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  and accounts for 25 % of the world reserves. Waste from its processing is more than  $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  per year. Environmental requirements for heat and power facilities are constantly growing. This determines the interest in biomass use.

**The main aim** of the research is to determine experimentally the dependences of ignition delay times during high-temperature heating of woody biomass of different moisture content using the example of four fairly accessible and widespread wood species (the most high-calorie and, therefore, promising) for heat power engineering.

**Object:** dry and moisture-saturated wood of four types (cedar, larch, pine and aspen). Experimental studies were carried out for wood particles with relative humidity: 5, 30 and 45 %.

**Methods:** experimental determination of the ignition temporal characteristics of wood particles under conditions corresponding to the intensity of heating to the combustion chambers of steam and hot water boilers using a high-speed video camera Photron FASTCAM CA4; registration of medium temperature using chromel-alumel thermocouples.

**Results.** The paper introduces the results of the experimental studies of ignition of dry and wet particles of four type of woody biomass in the environment of air heated to high temperatures in order to substantiate the resource efficiency of using woody biomass (as the base fuel of steam and hot water boilers). A significant effect of the wood type on the ignition conditions and characteristics of its single particles was established. A significant influence of humidity on the ignition delay times of particles of the studied types of biomass was established as well. Such times, corresponding to wood in its natural state, are 3–4 times higher in the entire (rather wide) range of change of temperatures significant for practice, the ignition delay times of dry wood particles. The regularities established in the conducted experiments illustrate the prospects of using woody biomass in heat power engineering as the main fuel or components of a charcoal mixture.

### Key words:

Wet wood, biomass, ignition, ignition delay time, thermal fuel preparation, experiment, energy efficiency.

The research was carried out due to the grant of the Russian Science Foundation (project no. 18-79-10015).

### REFERENCES

1. Aste N., Caputo P., Del Pero C., Ferla G., Enrique H., Cardenas H., Leonforte F., Miglioli A. A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system. *Energy*, 2020, vol. 206, 118091.
2. Sagastume Gutiérrez A., Balbis Morejóna M., José Cabello Eras J., Cabello Ulloa M., Javier Rey Martínez F., Gabriel Rueda-Bayona J. Data supporting the forecast of electricity generation capacity from non-conventional renewable energy sources in Colombia. *Data in Brief*, 2020, vol. 28, 104949.
3. Goodarzi Sh., Niles Perera H., Bunn D. The impact of renewable energy forecast errors on imbalance volumes and electricity spot prices. *Energy Policy*, 2019, vol. 134, 110827.
4. Coester A., Hofkes M.W., Papyrakis E. Economics of renewable energy expansion and security of supply: A dynamic simulation of the German electricity market. *Applied Energy*, 2018, vol. 231, pp. 1268–1284.
5. *Total primary energy supply (TPES) by source. Germany 1990–2018*. Available at: <https://www.iea.org/countries/germany> (accessed 15 October 2020).
6. *Renewable energy prospects: Germany*. Available at: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_REmap\\_Germany\\_report\\_2015-\(1\).pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Germany_report_2015-(1).pdf) (accessed 15 October 2020).
7. Galvan E., Mandal P., Sang Yu. Networked microgrids with rooftop solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 123, 106239.
8. David A. Wood. Hourly-averaged solar plus wind power generation for Germany 2016: Long-term prediction, short-term forecasting, data mining and outlier analysis. *Sustainable Cities and Society*, 2020, vol. 60, 102227.
9. Mukesh Kumar Awasthi, Surendra Sarsaiya, Anil Patel, Ankita Juneja, Rajendra Prasad Singh, Binghua Yan, Sanjeev Kumar Awasthi, Archana Jain, Tao Liu, Yumin Duan, Ashok Pandey, Zengqiang Zhang, Mohammad J. Taherzadeh. Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: an assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 127, 109876.
10. Sagastume Gutiérrez A.s, Cabello Eras J.J., Hens L., Vandecasteele C. The energy potential of agriculture, agroindustrial, live-

- stock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. *The case of Colombia. Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 269, 122317.
11. Markel E., Sims Ch., Burton C. English Policy uncertainty and the optimal investment decisions of second-generation biofuel producers. *Energy Economics*, 2018, vol. 76, pp. 89–100.
  12. Catalán-Martínez D., Domine M.E., Serra J.M. Liquid fuels from biomass: An energy self-sustained process integrating H<sub>2</sub> recovery and liquid refining. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 353–363.
  13. Ramon Filipe Beims, Yulin Hu, Hengfu Shui, Chunbao (Charles) Xu. Hydrothermal liquefaction of biomass to fuels and value-added chemicals: Products applications and challenges to develop large-scale operations. *Biomass and Bioenergy*, 2020, vol. 135, 105510.
  14. Zhengbin He, Jing Qian, Lijie Qu, Zhenyu Wang, Songlin Yi. Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying. *Results in Physics*, 2019, vol. 12, pp. 1299–1303.
  15. Shusen Wang, Chun Zou, Chun Lou, Haiping Yang, Mei Mei, Huixiang Jing, Sizhe Cheng. Effects of hemicellulose, cellulose and lignin on the ignition behaviors of biomass in a drop tube furnace. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 310, 123456.
  16. Sheng Qi, Zhihua Wang, Mário Costa, Yong He, Kefa Cen. Ignition and combustion of single pulverized biomass and coal particles in N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> environments. *Fuel*, 2021, vol. 283, 118956.
  17. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases. *Technical Physics*, 2014, vol. 59 (7), pp. 959–967.
  18. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high-temperature gases. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40 (6), pp. 499–502.
  19. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87 (1), pp. 98–106.
  20. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. Heat and mass transfer and hydrodynamics in gas-droplet flows. *Novosibirsk State Technical University*, 2009 vol. 282, pp. 282.
  21. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium. *Renewable Energy*, 2020, vol. 145, pp. 1474–1486.
  22. Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Isparenie kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Evaporation of water droplets in a high-temperature gas environment]. *Institute of Heat and Mass Transfer. A.V. Lykov NAS of Belarus*, 2019, vol. 89 (1), pp. 133–142.
  23. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y., Kostoreva A.A., Kostoreva Zh.A. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer. *Fuel*, 2019, vol. 252, pp. 19–36.
  24. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Malyshev D.Yu., Gutareva N.Yu., Nigay N.A.. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 170, 115034.
  25. Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 106, pp. 561–569.
  26. Salomatov V., Kuznetsov G., Syrodoy S., Gutareva N. Mathematical and physical modeling of the coal-water coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 628–643.
  27. Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N. Yu. Conditions of the water–coal fuel drop dispersion at their ignition in the conditions of high temperature heating. *Combustion science and technology*, 2019, vol. 191, pp. 2162–2184
  28. Malyshev D.Yu., Syrodoy S.V., Kostoreva J.A. Co-ignition of coal-water suspension and woody biomass. *Industrial energy*, 2020, vol. 5, pp. 44–49.
  29. Syrodoy S.V., Kostoreva J.A., Kostoreva A.A., Asadullina L.I. Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93 (2), pp. 443–449.
  30. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*, 1947, vol. 18, pp. 50–60.
  31. Kuznetsov G.V., Yankovsky S.A., Tolokolnikov A.A., Zenkov A.V., Cherednik I.V. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood. *Energy*, 2020, vol. 194, 116896.

Received: 26 October 2020.

#### Information about the authors

**Zhanna A. Kostoreva**, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry Yu. Malyshev**, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Semen V. Syrodoy**, Cand. Sc, researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 537.8+550.84

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ И ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДАМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И ЯМР-РЕЛАКСОМЕТРИИ

Мезин Андрей Алексеевич<sup>1</sup>,  
MezinAA@ipgg.sbras.ru

Шумскайте Мария Ионовна<sup>1</sup>,  
ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

Чернова Елена Сергеевна<sup>2</sup>,  
ellenchernova@yandex.ru

Бурухина Александра Ильинична<sup>1</sup>,  
BurukhinaAI@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

**Актуальность** работы обусловлена возрастающим интересом к комплексной интерпретации данных нескольких методов при определении петрофизических и физико-химических свойств горных пород и внутрипластовых флюидов. Физико-химические свойства нефти определяются по данным комплекса методов диэлектрической спектроскопии, ЯМР-релаксометрии и геохимического анализа. Результаты этих методов дополняют друг друга, поскольку отличаются разной чувствительностью к определенным характеристикам породы и насыщающего ее флюида.

**Цель:** совместная интерпретация данных методов диэлектрической спектроскопии и ЯМР-релаксометрии для определения группового состава и физико-химических свойств проб нефти, сопоставление с результатами геохимического анализа.

**Объекты:** пробы нефти и конденсатов месторождений Восточной и Западной Сибири, характеризующиеся разными физико-химическими свойствами.

**Методы:** лабораторные методы диэлектрической спектроскопии, направленной на определение комплексной диэлектрической проницаемости; ЯМР-релаксометрии, позволяющей оценить групповой состав исследуемого флюида; стандартные геохимические методы, включающие определение физико-химических свойств, фракционного и группового химического состава нефти.

**Результаты.** Изучено 48 проб нефтей и конденсатов месторождений Восточной и Западной Сибири. Для 29 проб установлены значения: плотности при 20 °С, вязкости при 20 и 60 °С, содержания температурных фракций выше и ниже 200 °С, содержания метано-нафтеновых и нафтено-ароматических углеводородов, смол и асфальтенов. Экспериментально установлена зависимость диэлектрической проницаемости и времени поперечной релаксации от содержания разных групп углеводородных соединений, которая показала высокую чувствительность применяемых в работе методов к содержанию смолисто-асфальтеновых соединений. Увеличение их доли в составе пробы нефти приводит к существенному уменьшению времен поперечной релаксации и значительному увеличению значений диэлектрической проницаемости. По ЯМР-данным был определен групповой состав проб нефти, который с точностью до 5 % при температуре 25 °С согласуется с результатами геохимического анализа. Поскольку времена поперечной релаксации ароматических соединений и насыщенных углеводородов сильно перекрываются, это не позволяет более детально установить граничные времена поперечной релаксации для каждой группы углеводородных соединений.

### Ключевые слова:

Групповой состав, диэлектрическая проницаемость, релаксационные характеристики, реологические свойства нефти, совместная интерпретация.

### Введение

Одной из основных тенденций в развитии интерпретационной базы лабораторных исследований при определении петрофизических параметров горных пород и физико-химических свойств внутрипластовых флюидов является комплексирование данных методов, основанных на разных физических принципах. К таким методам можно отнести диэлектрическую спектроскопию и ЯМР-релаксометрию. В формировании диэлектрической проницаемости (ДП) образца большую роль играют поляризационные процессы на

поверхности раздела фаз, при этом ядерно-магнитные свойства образца в значительной мере определяются процессами другого типа, действующими на тех же поверхностях. Разная чувствительность к определенным характеристикам породы и пластового флюида может дать дополнительную информацию об изучаемом объекте при комплексной интерпретации данных этих методов [1–4]. В табл. 1 приведена сравнительная чувствительность методов ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) и многочастотных электромагнитных исследований (МЭИ).

**Таблица 1.** Сравнительная чувствительность ЯМР и МЭИ [1]

**Table 1.** Comparative sensitivity of NMR and MES methods [1]

Характеристика породы Rock characteristic	Чувствительность ЯМР NRM sensitivity	Чувствительность МЭИ MES sensitivity
Пористость Porosity	Высокая High	Высокая (для водонасыщенной части) High (for water-saturated side)
Размер пор Pore size	Высокая High	Низкая Low
Подвижность воды Water mobility	Высокая High	Низкая Low
Соленость воды Water salinity	Нулевая Null	Высокая High
Вязкость нефти Oil viscosity	Высокая High	Нулевая Null
Присутствие тяжелой нефти Occurrence of heavy oil	Высокая (при неизвестной общей пористости) High (for unknown total porosity)	Высокая (при известной общей пористости) High (for known total porosity)
Парамагнитные примеси Paramagnetic impurities	Высокая (осложняет процесс измерения) High (complicate measurement process)	Нулевая Null

Таким образом, применение комплекса этих методов позволяет повысить точность определения структуры порового пространства горных пород и реологических свойств пластовых флюидов.

Целью работы является совместная интерпретация данных методов диэлектрической спектроскопии и ЯМР-релаксометрии для определения связи комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) и ЯМР-характеристик проб нефти и конденсатов месторождений Восточной и Западной Сибири, характеризующихся разными физико-химическими свойствами, с результатами геохимического анализа.

#### Методика проведения экспериментов

При измерении КДП образцов исследуемое вещество помещается в экспериментальную ячейку. Ячейка представляет собой цилиндрический конденсатор с внутренним диаметром внешнего электрода 50 мм, внешним диаметром внутреннего электрода 40 мм и высотой активной области 50 мм, и подключается к измерительному прибору двумя проводами. Измерительным прибором выступает измеритель комплексного импеданса LCR-78105G производства компании GwInstek с диапазоном рабочих частот 0,02–5000 кГц. После получения значений компонент импеданса рассчитываются значения емкости пустой ячейки, а после и ячейки с образцом. По рассчитанным данным определяется значение диэлектрической проницаемости (ДП) на соответствующей частоте [5, 6].

По описанной методике определены значения диэлектрической проницаемости 30 образцов нефти и

конденсатов. Дополнительно на 6 пробах проведены измерения по методике П.П. Боброва в частотном диапазоне от 20 Гц до 5 ГГц в коаксиальной ячейке [7, 8].

Экспериментальные исследования по определению ЯМР-характеристик проб нефти и конденсатов выполняются на ЯМР-релаксметре «МСТ-05» с величиной индукции магнитного поля 500–530 Гс (0,05 Тл) и рабочей частотой 2,2–2,3 МГц, диапазон измеряемых времён поперечной релаксации ( $T_2$ ) от 600 мкс до 10 с. Основным результатом ЯМР-измерения является релаксационная кривая, начальная амплитуда которой соответствует общему водородосодержанию, которое может быть пересчитано в общую ЯМР-пористость. Математическая обработка релаксационной кривой (методом наименьших квадратов с применением регуляризации Тихонова) дает распределение по временам  $T_2$ , соответствующее в пористой среде распределению пор по размерам, в жидкостях – групповому составу [9–16].

Характеристика физико-химических свойств нефтей и конденсатов изучаемой коллекции проведена по вязкости, плотности, групповому и фракционному составу. Аналитические исследования проводились современными стандартизованными методиками изучения состава и свойств углеводородных (УВ) флюидов [17], а именно: измерение плотности – вибрационным методом [18]; вязкости – с помощью вискозиметров Пинкевича [19]; определение фракционного состава и получение фракций, выкипающих при температурах выше и ниже 200 °С, – простой атмосферной перегонкой с однократным испарением [20]; определение группового состава – методом адсорбционной жидкостной хроматографии (для фракций выше 200 °С) и методом ИК-спектроскопии (для фракций ниже 200 °С) [21].

#### Описание исследуемой коллекции проб нефтей и конденсатов

Исследованная коллекция представлена поверхностными пробами нефтей (44 пробы) и конденсатов (4 пробы), отобранными из залежей кембрия, венда, рифея месторождений Восточной Сибири; залежей средней, верхней юры, верхнего и нижнего мела месторождений Западной Сибири с диапазона глубин от 1673–1680 до 3639–3659 м, различающихся по своим физико-химическим свойствам. Представительность коллекции отражена в табл. 2.

Комплекс методов, направленных на определение физико-химических свойств нефтей и конденсатов, применен для 29 проб изучаемой коллекции (4 конденсата, 25 нефтей). Для них установлены значения плотности при 20 °С (29 проб), вязкости при 20 и 60 °С (26 и 25 проб, соответственно), содержания температурных фракций выше и ниже 200 °С (24 пробы), содержания метано-нафтеновых (Me-Nn) и нафтеноароматических (Nn-Ar) УВ, смол и асфальтенов в общем составе нефтей и конденсатов (29 проб) и в их температурных фракциях (22 пробы).

**Таблица 2.** Представительность исследованной коллекции проб и комплекс выполненных анализов

**Table 2.** Representativeness of the studied samples collection and a set of analyzes

№ пробы Probe no.	Месторождение Field	Тип флюида Fluid type	Физико-химические свойства Physical/chemical properties	КДП CDP	ЯМР NMR
1	Новопортовское Novoportovskoe	нефть/oil	+	–	+
2	Бованенковское Bovanenkovskoe	нефть/oil	+	–	+
3	Новопортовское Novoportovskoe	нефть/oil	+	–	+
4	Новопортовское Novoportovskoe	нефть/oil	+	–	+
5	Геофизическое Geophysicheskoe	нефть/oil	+	–	+
6	Восточно-Мессояхское Vostochno-Messoyskhscoe	нефть/oil	+	–	+
7	Ванкорское/Vankorskoe	нефть/oil	+	–	+
8	Салымское/Salymское	нефть/oil	+	+	+
9	Правдинское/Pravdinskoe	нефть/oil	+	–	+
10	Заполярье/Zapolyarnoe	нефть/oil	+	–	+
11	Правдинское/Pravdinskoe	нефть/oil	+	–	+
12	Русское/Russkoe	нефть/oil	+	–	+
13	Ямбургское/Yamburgskoe	нефть/oil	+	–	+
14	Западно-Тамбейское Zapadno-Tambeyskoe	нефть/oil	+	+	+
15	Сузунское/Suzunskoe	нефть/oil	+	–	+
16	Восточно-Мессояхское Vostochno-Messoyskhscoe	нефть/oil	+	–	+
17	Салмановское/Salmanovskoe	конденсат/condensate	+	–	+
18	Салмановское/Salmanovskoe	конденсат/condensate	+	–	+
19	Етыпурское/Etypurskoe	нефть/oil	+	–	+
20	Ваньеганское/Vaneganskoe	нефть/oil	+	–	+
21	Утреннее/Utrennee	конденсат/condensate	+	+	+
22	Паяхское/Payakhskoe	нефть/oil	+	+	+
23	Восточно-Бованенковское Vostochno-Bovanenkovskoe	нефть/oil	+	+	+
24	Солецкое/Soletskoe	конденсат/condensate	+	+	+
25	Ванкорское/Vankorskoe	нефть/oil	+	+	+
26	Ярудейское/Yarudeyskoe	нефть/oil	–	+	+
27	Уренгойское/Urengoyskoe	нефть/oil	+	+	+
28	Верхнечасельское Verkhnecheselskoe	нефть/oil	–	+	+
29	Кислорское/Kislorskoe	нефть/oil	–	+	+
30	Лунгорская пл./Lungorskaya pl.	нефть/oil	–	+	+
31	Западно-Котухтинское Zapadno-Kotukhtinskoe	нефть/oil	–	+	+
32	Северо-Толькинская пл. Severo-Tolkinskaya pl.	нефть/oil	–	+	+
33	Мотртунья-Тетеревское Motrtynya-Teterevskoe	нефть/oil	–	+	+
34	Советское/Sovetskoe	нефть/oil	–	+	+
35	Кондаковское/Kondakovskoe	нефть/oil	–	+	+
36	Пихтовая пл./Pikhtovaya pl.	нефть/oil	+	+	+
37	Первомайское/Pervomayskoe	нефть/oil	–	+	+
38	Соболиное/Sobolinoe	нефть/oil	–	+	+
39	Веселовское/Veselovskoe	нефть/oil	–	+	+
40	Маччобинская пл. Machobinskaya pl.	нефть/oil	–	+	+
41	Верхневелючанская пл. Verkhnevelyuchinskaya pl.	нефть/oil	–	+	+
42	Среднеботуобинская пл. Srednebotuobinskaya pl.	нефть/oil	–	+	+
43	Моктаконская пл. Moktakonskaya pl.	нефть/oil	–	+	+
44	Куюмбинская пл. Kuyumbinskaya pl.	нефть/oil	+	+	+
45	Верхнечонская пл. Verkhnechonskaya pl.	нефть/oil	–	+	+
46	Талаканское/Talakanskoe	нефть/oil	–	+	+
47	Юрубчено-Тохомское Yurubcheno-Tokhomskoe	нефть/oil	–	+	+
48	Левобережное/Levoberezhnoe	нефть/oil	+	+	+

По значениям плотности пробы коллекции относятся к УВ особо легкого типа (конденсатные пробы № 17, 18, 21, 24; нефтяные пробы № 8, 10, 13, 14, 19, 22, 23, 27), легкого типа (нефтяные пробы № 11, 15, 20, 25), среднего (нефтяные пробы № 1, 3, 4, 6, 9), тяжелым (нефтяная проба № 16) и битуминозным (нефтяные пробы № 2, 5, 7, 12, 36) [22]. Диапазон значений плотности: 0,739–0,937 г/см<sup>3</sup>. Большая часть проб коллекции (пробы № 6, 8, 10, 11, 13, 14, 17–25, 27, 48) соответствует УВ флюидам незначительной динамической вязкости (при 20 °С), пять нефтяных проб (№ 3, 9, 15, 16, 44) – маловязким, три нефтяные пробы (№ 1, 4, 5) –

повышенной вязкости, и одна нефтяная проба (№ 7) – высоковязким. При этом динамическая вязкость битуминозных нефтей (№ 2, 12, 36), в соответствии с техническими возможностями лабораторного анализа, определена только при 60 °С, полученные значения позволяют отнести их к высоковязким УВ флюидам.

Конденсаты коллекции закономерно характеризуются наибольшим содержанием бензиновой фракции (до 200 °С) – 52–95 %. В составе особо легких нефтяных проб содержание бензиновой фракции в среднем равно 40 %, в составе более тяжелых – 22 %.

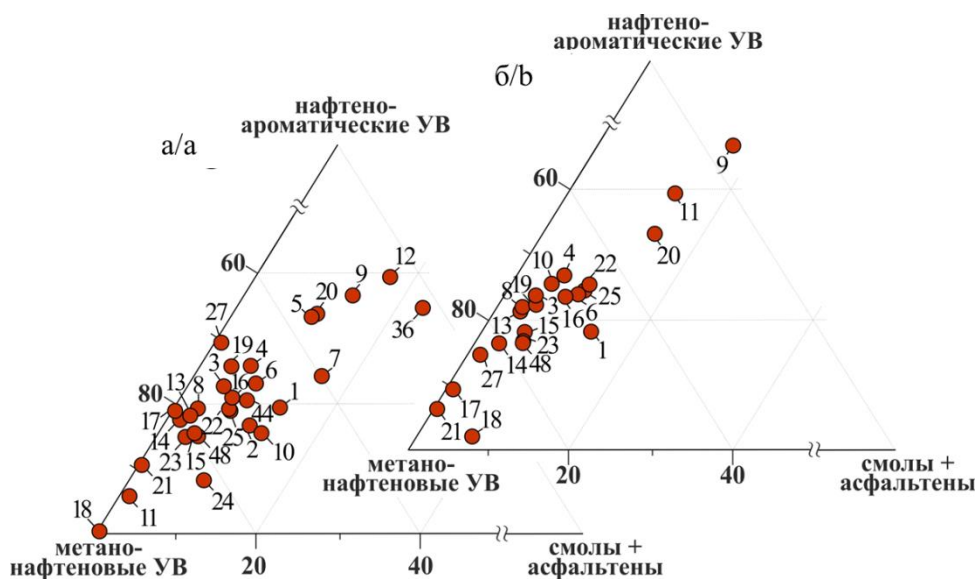


Рис. 1. Групповой состав исследованной коллекции проб: а) на нефть (конденсат); б) на фракцию, выкипающую при температуре выше 200 °С

Fig. 1. Group composition of the studied sample collection: a) for oil (condensate); b) for fraction boiling above 200 °С

В групповом составе нефтей и конденсатов коллекции преобладают УВ компоненты (Me-Nn и Nn-Ag) – более 77 мас. % на нефть (конденсат). В то же время содержание Me-Nn, Nn-Ag и смолисто-асфальтеновых компонентов меняется в широком диапазоне: 42,2–99,6 мас. %; 0,1–39,9 мас. %; 0,2–22,7 мас. %, соответственно. Для особо легких и легких проб коллекции характерны в среднем более высокие концентрации насыщенных УВ (78,5 мас. %), более низкие ароматических УВ (17,2 мас. %) и смолисто-асфальтеновых компонентов (11,6 мас. %) (рис. 1, а). Наряду с этим более тяжелые нефтяные пробы содержат в среднем 61,2 мас. % Me-Nn УВ, 27,2 мас. % Nn-Ag УВ и 11,6 мас. % смол и асфальтенов (рис. 1, а).

В составе фракции, выкипающей при температуре выше 200 °С, преобладающую долю имеют Me-Nn УВ (в среднем 71,6 мас. % на фракцию), меньше Nn-Ag УВ (в среднем 21,2 мас. %), еще меньше смол и асфальтенов (в среднем 7 мас. %) (рис. 1, б).

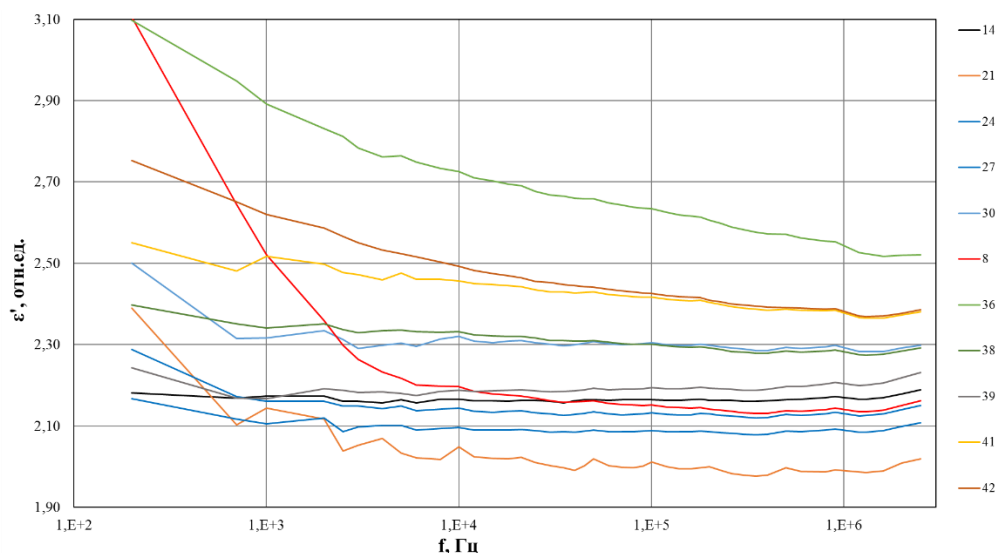
Легкокипящая фракция (ниже 200 °С) нефтей и конденсатов коллекции преимущественно состоит из Me-Nn УВ (в среднем 86,6 мас. % на фракцию). Отклоняются от этой закономерности три нефтяные пробы – № 3, 19 и 27, в составе их легкокипящих фракций, несмотря на фактическое преобладание Me-

Nn УВ (52,1–67,6 мас. %), сравнительно повышены концентрации Nn-Ag УВ (32,4–47,9 мас. %).

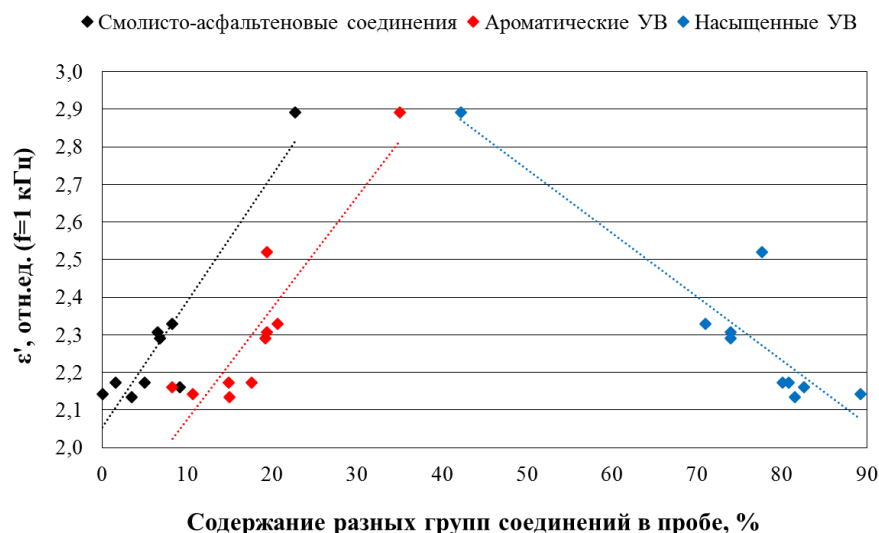
#### Комплексная диэлектрическая проницаемость и ЯМР-характеристики проб нефтей и конденсатов

На пробах нефтей и конденсатов выполнены эксперименты по определению диэлектрических (на 30 образцах + 6 повторно) и ЯМР-характеристик (на 48 образцах). Действительная часть КДП ( $\epsilon'$ ) на частоте (f) 1 кГц меняется в диапазоне 2,1–2,89 отн.ед., достигая максимальных значений для проб № 8 и 36 (рис. 2).

На рис. 2 видно, что зависимости действительной части КДП от частоты для трех проб нефти (№ 8, 36 и 42) существенно отличаются от зависимостей для остальных проб. У этих образцов наблюдается ярко выраженная релаксация ДП, которая может быть вызвана наличием релаксанта (вода, соль) в составе образца. В пробе № 8 (Салымское месторождение баженновской свиты) содержание солей, вероятно, превышает их содержание в пробах № 36 и 42. Для остальных образцов зависимости имеют схожий вид кривых, отличаются только значениями ДП, которая зависит от группового состава проб нефти и конденсатов (рис. 3).



**Рис. 2.** Зависимость действительной части КДП от частоты  
**Fig. 2.** Dependence of the complex dielectric permittivity (CDP) real part on frequency



**Рис. 3.** Зависимость действительной части КДП от группового состава проб нефтей и конденсатов на частоте 1 кГц  
**Fig. 3.** Dependence of the CDP real part on the group composition of oil and condensate samples at a frequency of 1 kHz

На рис. 3 видна линейная зависимость значений КДП от процентного содержания разных групп углеводородных соединений. При увеличении количества смолисто-асфальтеновых и ароматических соединений значения КДП увеличиваются, при этом увеличение насыщенных УВ сопровождается уменьшением значений КДП. Такое поведение можно объяснить тем, что у смолисто-асфальтеновых и ароматических соединений значение КДП на частоте 1 кГц существенно выше, чем у насыщенных.

По данным геохимического анализа и диэлектрической спектроскопии было проведено математическое моделирование значений ДП компонент нефти в отдельности. Используя простую формулу смешивания (сумма произведений объемной доли компоненты на значение ДП), установлено, что значение КДП для смолисто-асфальтеновых соединений составляет  $\approx 3,5$  отн. ед., для ароматических соединений – 2,9 отн. ед. и для насыщенных УВ – порядка 1,9 отн. ед. Полу-

ченные результаты подтверждают гипотезу, описанную выше.

По ЯМР-данным пробы характеризуются широкими диапазонами времен  $T_2$  (от 11 до 1500 мс со средним значением 310 мс) и водородосодержания (от 60 до 98 %). Спектры по временам поперечной релаксации также значительно отличаются по амплитуде, ширине и положению на оси  $T_2$  (рис. 4).

По спектрам видно, что из представленных на графике проб проба № 36 характеризуется наименьшими значениями среднего логарифмического времени поперечной релаксации ( $T_2^{LM}$  – среднее значение времени поперечной релаксации по спектру с учетом вклада каждой компоненты со своим значением  $T_2$ , для пробы № 36 составляет 21 мс), что объясняется высоким содержанием смолисто-асфальтеновых соединений ( $>20$  %). Ее вязкость из изученных образцов самая высокая: при 60 °C она составляет 102,8 мм<sup>2</sup>/с, а плотность равна 0,9103 г/см<sup>3</sup>. При этом можно отме-

тить, что самой легкой является проба № 21 с вязкостью 0,77 мм<sup>2</sup>/с и плотностью 0,7393 г/см<sup>3</sup>. Содержание смолисто-асфальтеновых соединений в пробе <1 %, что в наибольшей степени определяет значения  $T_2^{LM}$  этой пробы больше 1000 мс.

Как и в случае диэлектрических свойств, ЯМР-характеристики (в частности  $T_2^{LM}$ ) напрямую зависят от группового состава исследуемых проб. Рассмотрим зависимость времени поперечной релаксации от группового состава проб нефти и конденсатов (рис. 5).

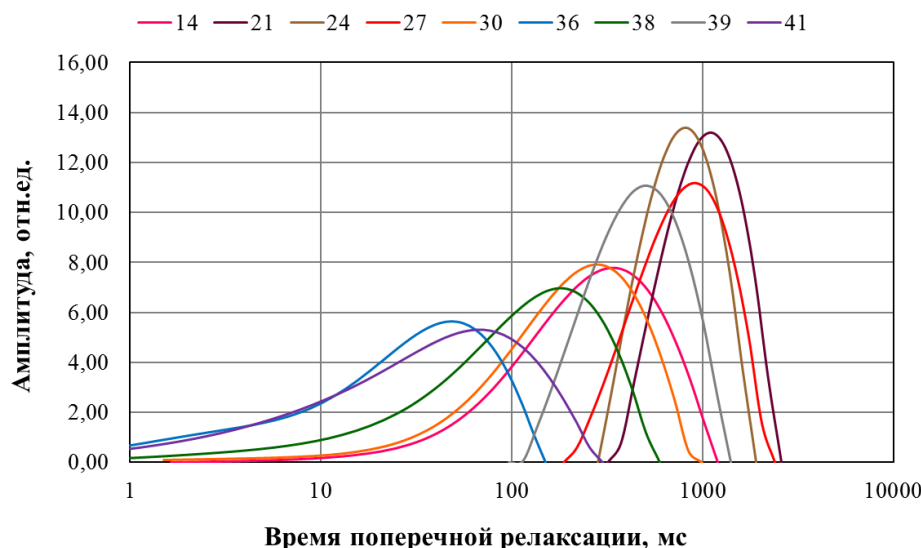


Рис. 4. Спектры времен поперечной релаксации для ряда проб исследуемой коллекции  
 Fig. 4. Transverse relaxation times spectra for several studied collection samples

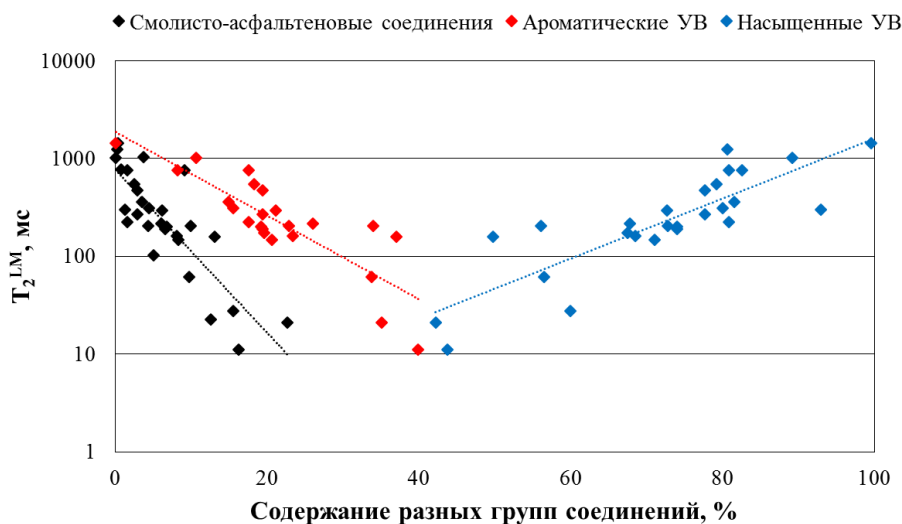


Рис. 5. Зависимость времени поперечной релаксации от группового состава проб нефти и конденсатов  
 Fig. 5. Dependence of the transverse relaxation times on the group composition of oil and condensate samples

На рис. 5 наблюдаются зависимости обратные зависимостям, представленным на рис. 3. Увеличение содержания смолисто-асфальтеновых и ароматических соединений приводит к уменьшению значений  $T_2^{LM}$ , в то время как увеличение доли насыщенных УВ увеличивает значения  $T_2^{LM}$ . Это объясняется тем, что наличие смолисто-асфальтеновых соединений затрудняет свободное движение молекул в образце и приводит к ускорению релаксационных процессов и существенно уменьшению времен поперечной релаксации, так как они представляют собой большие агрегаты-кластеры со сложной надмолекулярной структурой [23]. Можно сделать вывод, что КДП имеет обратную зависимость от времени  $T_2^{LM}$ . Чем

больше значения  $T_2^{LM}$  пробы нефти/конденсата, тем выше содержание в ней насыщенных УВ и ниже смолисто-асфальтеновых и ароматических соединений, а реальная часть КДП будет меньше (рис. 6).

В рамках настоящей работы также был определен групповой состав всех проб коллекции по их ЯМР-характеристикам путем разделения на интервалы  $T_2$ , характерные для каждой из групп соединений. При температуре 25 °С времена поперечной релаксации  $T_2$  смолисто-асфальтеновых соединений не превышают 30 мс, ароматических соединений – 500 мс, насыщенных УВ – 1200 мс (данные получены по результатам ЯМР-измерений исследуемых 48 проб нефти).



Оцененный при помощи метода ЯМР-релаксометрии групповой состав согласуется с результатами стандартного геохимического анализа, расхождение при комнатной температуре составляет не более 5 % (рис. 7).

Установить более детальные границы времен  $T_2$  для каждой группы УВ-соединений пока не удастся. Смолисто-асфальтеновые соединения определяются с высокой точностью, значения  $T_2$  для них составляют

0,1–30 мс, в то время как значения  $T_2$  для ароматических соединений и насыщенных УВ сильно перекрываются. Это не позволяет выделить каждую группу отдельно. В этом направлении ведется работа, связанная с расширением коллекции исследуемых образцов нефти, проведением дополнительных экспериментальных исследований и усовершенствованием методики обработки исходного ЯМР-сигнала.

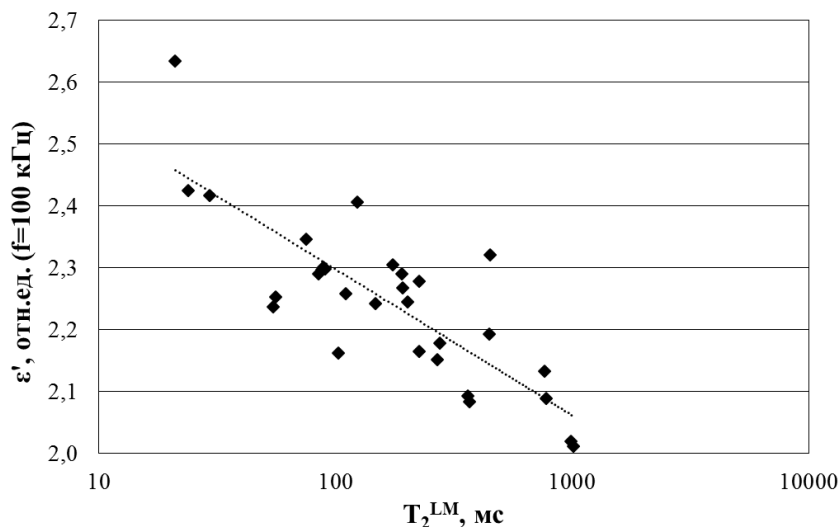


Рис. 6. Зависимость действительной части КДП от среднего логарифмического времени поперечной релаксации на частоте 100 кГц

Fig. 6. Dependence of the CDP real part on the logarithmic mean of transverse relaxation times at a frequency of 100 kHz

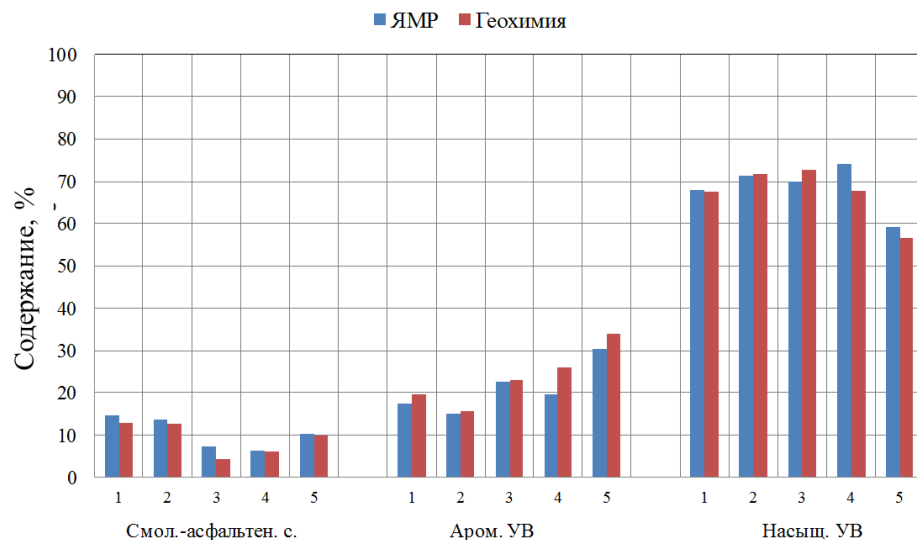


Рис. 7. Групповой состав проб нефти, полученный по данным ЯМР-релаксометрии и геохимического анализа

Fig. 7. Group composition of oil samples obtained from the NMR-relaxometry and geochemical analysis data

### Заключение

В рамках выполненного исследования экспериментально установлено, что совместная интерпретация данных методов диэлектрической спектроскопии и ЯМР-релаксометрии позволяет получить дополнительную информацию о физико-химических свойствах нефти. Оба метода являются очень чувствительными к наличию и содержанию смолисто-асфальтеновых со-

единений: увеличение их доли в составе пробы нефти приводит к существенному уменьшению времен поперечной релаксации и значительному увеличению значений комплексной диэлектрической проницаемости. Наличие смолисто-асфальтеновых соединений затрудняет свободное движение молекул в образце, что приводит к увеличению вязкости, ускорению релаксационных процессов и существенному уменьшению времен поперечной релаксации.

Групповой состав проб нефти, определенный при температуре 25 °С по данным ЯМР-метода, согласуется с результатами геохимического анализа с точностью до 5 %. При повышении температуры измерения точность определения группового состава уменьшается. Установить точные границы времен  $T_2$  для каждой группы углеводородных соединений не удастся, поскольку времена поперечной релаксации аромати-

ческих и насыщенных углеводородов сильно пере-  
крываются.

*Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных научных исследований № 0266-2019-0006 «Разработка методик оценки ресурсов, разведки и подсчета запасов залежей трудноизвлекаемой нефти в углеродистых карбонатно-глинисто-кремнистых, карбонатных и засоленных песчаных коллекторах».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксельрод С.М. Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. – 2012. – № 4 (214). – С. 78–112.
2. Связь комплексной диэлектрической проницаемости нефти с ее физико-химическими свойствами и ЯМР-характеристиками / А.А. Мезин, М.И. Шумскайте, Н.А. Голиков, А.И. Бурухина // Геофизические технологии. – 2019. – № 4. – С. 24–34. URL: <https://www.rjgt.ru/jour/article/view/83> (дата обращения 15.07.2020).
3. Hysteresis of the NMR response and the complex relative permittivity of the quartz granules powders and solid sandstones during the water imbibition and drainage / A.S. Lapina, P.P. Bobrov, N.A. Golikov, A.V. Repin, M.Y. Shumskayte // Measurement Science and Technology. – 2017. – Т. 28. – № 1. – P. 014007–014007.
4. Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N. Improving Petrophysical Interpretation with Wide-Band Electromagnetic Measurements // SPE Journal. – June 2008. – P. 205–215.
5. The magneto-dielectric anisotropy effect in the oil-based ferrofluid / Š. Harđoň, J. Kúdelčík, E. Jahoda, M. Kúdelčíkova // International Journal of Thermophysics. – 2019. – Т. 40. – № 2. – 11 с.
6. Singh S.P., Chandel V.S., Manohar R. Dielectric study of Clove oil // Journal of Ayurveda and integrative medicine. – 2018. – V. 9. – № 1. – P. 53–56.
7. Бобров П.П., Кондратьева (Родионова) О.В., Репин А.В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8/3. – С. 23–26.
8. Способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких и сыпучих веществ: пат. Рос. Федерация, № 2012119574, заявл. 14.11.2013; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. – 15 с.
9. Лабораторное изучение жидкостей, выносимых из скважин, методом ЯМР-релаксометрии / М.И. Шумскайте, В.Н. Глинских В.Н., С.Б. Бортникова, А.Н. Харитонов, В.С. Пермяков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 59–66.
10. Применение ядерного магнитного резонанса-релаксометрии для экспресс-исследования реологических свойств и группового состава нефти и конденсата / А.Х. Тураханов, В.Н. Глинских, В.А. Каширцев, Е.А. Фурсенко, М.И. Шумскайте // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12. – № 3. – С. 1–15. URL: [http://www.ngtp.ru/rub/2017/29\\_2017.html](http://www.ngtp.ru/rub/2017/29_2017.html) (дата обращения 15.07.2020).
11. Carr H.Y., Purcell E.M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments // Physical review. – 1954. – V. 94. – P. 630–638.
12. Coates J., Xiao L., Prammer M. NMR logging. Principles and applications. – Houston: Halliburton Energy Services, 1999. – 342 p.
13. Dunn K.J., Bergman D.J., LaTorracca G.A. Nuclear magnetic resonance. Petrophysical and logging application. – London: PERGAMON, 2002. – 294 p.
14. Автоматизированный малогабаритный релаксометр ядерного магнитного резонанса / З.Ш. Идиятуллин, А.Н. Темников, О.В. Рыбаков, Р.С. Кашаев // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 5. – С. 237–238.
15. Кашаев Р.С. Структурно-динамический анализ нефтяных дисперсных систем. – Казань: Грандан, 1999. – 129 с.
16. Кашаев Р.С. Изучение динамики структурного упорядочения в нефтяных дисперсных системах методом ЯМР // Нефтехимия. – 2003. – Т. 43. – № 2. – С. 143–150.
17. Chemical fingerprints of crude oils and petroleum products / C. Yang, C.E. Brown, B. Hollebone, Z. Yang, P. Lambert, B. Fieldhouse, M. Landriault, Z. Wang. – Canada: Environ, 2017. – 465 p.
18. ГОСТ Р 57037-2016. Нефтепродукты. Определение плотности, относительной плотности и плотности в градусах API цифровым плотномером. – М.: Стандартинформ, 2016. – 14 с.
19. ГОСТ 33-2000. Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 20 с.
20. ГОСТ 2177-99. Нефтепродукты. Метод определения фракционного состава. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 24 с.
21. Современные методы исследования нефтей: справочно-методическое пособие / под ред. А.И. Богомолова, М.Б. Темьянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984. – 431 с.
22. Методические рекомендации по применению классификации запасов и ресурсов нефти и горючих газов / под ред. С.Е. Донского. – М.: Минприроды России, 2016. – 32 с.
23. Jones M., Taylor S.E. NMR relaxometry and diffusometry in characterizing structural, interfacial and colloidal properties of heavy oils and oil sands // Advances in Colloid and Interface Science. – 2015. – V. 224. – P. 33–45.

*Поступила: 21.07.2020 г.*

#### Информация об авторах

**Мезин А.А.**, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Шумскайте М.И.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Чернова Е.С.**, магистрант Новосибирского государственного университета.

**Бурухина А.И.**, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDK 537.8+550.84

## PHYSICAL/CHEMICAL PROPERTIES OF OIL FROM EASTERN AND WESTERN SIBERIA DEPOSITS: INTEGRATED STUDY BY DIELECTRIC SPECTROSCOPY AND NMR RELAXOMETRY METHODS

**Andrey A. Mezin**<sup>1</sup>,  
MezinAA@ipgg.sbras.ru

**Mariya Y. Shumskayte**<sup>1</sup>,  
ShumskayteMI@ipgg.sbras.ru

**Elena S. Chernova**<sup>2</sup>,  
ellenchernova@yandex.ru

**Alexandra I. Burukhina**<sup>1</sup>,  
BurukhinaAI@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the increasing interest in an integrated interpretation of several methods data to determining the petrophysical and physical/chemical properties of rocks and intraformational fluids. The physical/chemical properties of oil are determined by a complex of data methods of dielectric spectroscopy, NMR relaxometry and geochemical analysis. The results of these methods are complemented each other, since they differ in different sensitivity to some characteristics of the rock and its saturating fluid.

**The main aim** of the research is the sequential interpretation of dielectric spectroscopy and NMR relaxometry methods to determine the group composition and physical/chemical properties of oil samples, comparison of the obtained results with the results of geochemical analysis.

**Objects:** oil and condensate samples from Eastern and Western Siberia deposits characterized by different physical/chemical properties.

**Methods:** laboratory methods of dielectric spectroscopy aimed at determining the complex dielectric constant; NMR relaxometry which allows assessing the group analysis of studied fluid; standard geochemical methods including determination of physical/chemical properties, fractional and group chemical composition of oil.

**Results.** 48 samples of oils and condensates from fields in Eastern and Western Siberia have been studied. The values were established for 29 samples: density at 20 °C, viscosity at 20 and 60 °C, content of temperature fractions above and below 200 °C, content of methanaphthenic and naphthenic-aromatic hydrocarbons, resins and asphaltenes. The dependence of the dielectric constant and the transverse relaxation time on the content of different hydrocarbon compounds groups was experimentally established, which showed a high sensitivity of the methods used in this work to the content of resinous-asphaltene compounds. Increasing their proportion in the composition of an oil sample leads to a significant decrease in the transverse relaxation times and a significant increase in the values of the dielectric constant. The NMR data was used to determine the group composition of oil samples, which is consistent with the results of geochemical analysis with an accuracy of 5 % at a temperature of 25 °C. Since the transverse relaxation times of aromatic compounds and saturated hydrocarbons characterized by high overlap, this does not allow us to establish in more detail the boundary transverse relaxation times for each group of hydrocarbon compounds.

### Key words:

Group analysis, dielectric permittivity, relaxation characteristics, rheological properties of oils, sequential interpretation.

The research was carried out within the project of fundamental scientific researches no. 0266-2019-0006 «Development of techniques for assessing resources, exploration and estimation of reserves of unconventional oil in carbon, carbonate-argillaceous-silica, carbonate and saline sandy reservoirs».

### REFERENCES

1. Akselrod S.M. Novye tendentsii v dielektricheskom karotazhe (po materialam zarubezhnoy pechati) [New trends in dielectric logging (based on materials from foreign press)]. *Karotazhnik*, 2012, no. 4 (214), pp. 78–112.
2. Mezin A.A., Shumskayte M.Y., Golikov N.A., Burukhina A.I. Relation of integrated dielectric permeability of oil with its physical and chemical properties and NMR characteristics. *Russian Journal of Geophysical Technologies*, 2019, no. 4, pp. 24–34. In Rus.
3. Lapina A.S., Bobrov P.P., Golikov N.A., Repin A.V., Shumskayte M.Y. Hysteresis of the NMR response and the complex relative permittivity of the quartz granules powders and solid sandstones during the water imbibition and drainage. *Measurement Science and Technology*, 2017, vol. 28, no. 1, pp. 014007–014007.
4. Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N. Improving Petrophysical Interpretation with Wide-Band Electromagnetic Measurements. *SPE Journal*, June 2008, pp. 205–215.
5. Harđoň Š., Kúdelcík J., Jahoda E., Kúdelcikovka M. The magneto-dielectric anisotropy effect in the oil-based ferrofluid. *International Journal of Thermophysics*, 2019, vol. 40, no. 2, 11 p.
6. Singh S.P., Chandel V.S., Manohar R. Dielectric study of Clove oil. *Journal of Ayurveda and integrative medicine*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 53–56.
7. Bobrov P.P., Kondrateva (Rodionova) O.V., Repin A.V. Izmerenie kompleksnoy dielektricheskoy pronitsaemosti obratzsa v odnoy yacheyke ot desyatkov gerts do edinits gigagerts [Measurement of the complex dielectric constant of a sample in one cell from tens of hertz to units of gigahertz]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 8/3, pp. 23–26.

8. Bobrov P.P., Kondrateva (Rodionova) O.V., Repin A.V. *Sposob izmereniya kompleksnoy dielektricheskoy pronitsaemosti zhidkikh i sypuchikh veshhestv* [Method for measuring the complex dielectric constant of liquid and bulk substances]. Patent RF, no. 2012119574, 2014.
9. Shumskayte M.Y., Glinskikh V.N., Bortnikova S.B., Hari-tonov A.N., Permyakov V.S. NMR-relaxometry laboratory study of fluids taken from boreholes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 2. pp. 59–66. In Rus.
10. Turakhanov A.H., Glinskikh V.N., Khashirtsev V.A., Fursenko E.A., Shumskayte M.Y. The application of the nuclear magnetic resonance relaxometry method to express-study of rheological properties and composition of oil and gas condensate. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 1–15. In Rus.
11. Carr H.Y., Purcell E.M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments. *Physical review*, 1954, vol. 94, pp. 630–638.
12. Coates J., Xiao L., Prammer M. *NMR logging. Principles and applications*. Houston, Halliburton Energy Services, 1999. 342 p.
13. Dunn K.J., Bergman D.J., LaTorracca G.A. *Nuclear magnetic resonance. Petrophysical and logging application*. London, PERGAMON, 2002. 294 p.
14. Idiyatullin Z.Sh., Temnikov A.N., Rybakov O.V., Kashaev R.S. Avtomatizirovanny malogabaritny relaxometr yadernogo magnitnogo rezonansa [Automated small-sized nuclear magnetic resonance relaxometer]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1992, no. 5, pp. 237–238.
15. *Strukturno-dinamichskiy analiz neftyanykh dispersnykh sistem* [Structural-dynamic analysis of oil dispersed systems]. Ed. by R.S. Kashaev. Kazan, Grandan Publ., 1999. 129 p.
16. Kashaev R.S. Izucheniye dinamiki strukturnogo uporyadocheniya v neftyanykh dispersnykh sistemakh metodom YaMR [Study of the dynamics of structural ordering in petroleum dispersed systems by NMR]. *Neftekhimiya*, 2003, vol. 43, no. 2, pp. 143–150.
17. Yang C., Brown C.E., Hollebone B., Yang Z., Lambert P., Fieldhouse B., Landriault M., Wang Z. *Chemical fingerprints of crude oils and petroleum products*. Canada, Environ, 2017. 465 p.
18. GOST 57037-2016. *Nefteprodukty. Opredeleniye plotnosti, otноситelnoy plotnosti i plotnosti v gradusakh API tsifrovym plotnomerom* [State Standard 57037-2016. Petroleum products. Determination of density, relative density and API gravity with a digital density meter]. Moscow, StandartInform Publ., 2016. 14 p.
19. GOST 33-2000. *Nefteprodukty. Prozhachnye i neprozrachnye zhidkosti. Opredeleniye kinemacheskoy vjazkosti i raschet dinamicheskoy vjazkosti* [State Standard 33-2000. Petroleum products. Transparent and opaque liquids. Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity]. Moscow, Publishing of standards, 2008. 20 p.
20. GOST 2177-99. *Nefteprodukty. Metod opredeleniya fraktsionnogo sostava* [State Standard 2177-99. Petroleum products. Method for determining fractional composition]. Moscow, Publishing of standards, 2006. 24 p.
21. *Sovremennyye metody issledovaniya neftey: spravochno-metodicheskoe posobie* [Modern methods of oil research: reference and methodological manual]. Eds. A.I. Bogomolov, M.B. Temyanko, L.I. Khotyntseva. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 431 p.
22. *Metodicheskie rekomendatsii po primeniyu klassifikatsii zapasov i resursov nefti i goryuchikh gazov* [Guidelines for the application of the classification of reserves and resources of oil and combustible gases]. Ed by. S.E. Donskoy. Moscow, Minpriridy Rossii Publ., 2016. 32 p.
23. Jones M., Taylor S.E. NMR relaxometry and diffusometry in characterizing structural, interfacial and colloidal properties of heavy oils and oil sands. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, vol. 224, pp. 33–45.

Received: 21 July 2020.

#### Information about the authors

**Andrey A. Mezin**, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

**Mariya Y. Shumskayte**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

**Elena S. Chernova**, postgraduate student, Novosibirsk State University.

**Alexandra I. Burukhina**, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

УДК 622.276

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ НАГНЕТАТЕЛЬНЫМИ И ДОБЫВАЮЩИМИ СКВАЖИНАМИ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Пономарева Инна Николаевна<sup>1</sup>,  
permpolitech@gmail.com

Мартюшев Дмитрий Александрович<sup>1</sup>,  
martyushevd@inbox.ru

Черный Константин Анатольевич<sup>1</sup>,  
sms@pstu.ru

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что гидродинамическая связь между нагнетательной и добывающей скважинами – важнейшее условие полной выработки запасов. Изучение закономерности распределения объемов закачки в пределах целевого объекта – важнейшая задача мониторинга его разработки. На сегодняшний день предприятия нефтегазовой промышленности для этих целей применяют методы гидропрослушивания и индикаторных исследований. Данные методы могут наиболее точно оценить направления движения фильтрационных потоков, но ввиду дороговизны и длительности проведения данных исследований на месторождениях Пермского края проводятся нечасто. В работе предлагается оценивать распределение объемов закачки в пределах элемента системы разработки посредством корреляции накопленных характеристик их работы.

**Цель:** разработка косвенного способа, позволяющего количественно оценить распределение закачиваемой в пласт воды, основанного на использовании промышленного материала.

**Объект:** карбонатные залежи Гагаринского, Озерного и Опалихинского нефтяных месторождений.

**Методы:** геолого-промысловые исследования, корреляционный анализ.

**Результаты.** Многоуровневое статистическое моделирование позволило установить стадийность процесса влияния накопленной закачки на накопленную добычу жидкости и на количественном уровне обосновать граничные значения перехода от одной стадии к другой. Выполненный анализ динамики коэффициента корреляции между накопленными значениями закачки воды и добычи жидкости позволил установить качественные показатели работы системы заводнения в пределах рассматриваемого элемента системы разработки. Полученные качественные показатели работы системы заводнения демонстрируют высокую достоверность практического применения, что подтверждено материалами трассерных исследований, применительно к карбонатным залежам Гагаринского, Озерного и Опалихинского нефтяных месторождений.

### Ключевые слова:

Система поддержания пластового давления, выработка запасов, трассерные исследования, гидропрослушивание, добыча нефти, закачка агента, статистические методы.

### Введение

Наличие взаимодействия между нагнетательной и добывающей скважинами – важнейшее условие реализации эффективной системы поддержания пластового давления и выработки запасов в целом. В пределах системы разработки нагнетательные скважины должны быть размещены таким образом, чтобы максимальное количество закачиваемой в пласт воды обеспечивало вытеснение нефти из пустотного пространства. В этой связи изучение закономерности распределения объемов закачки в пределах целевого объекта – важнейшая задача мониторинга его разработки.

В настоящее время существует несколько методов решения указанной задачи. Наиболее достоверным способом исследования распределения объемов закачиваемой в пласт воды, очевидно, следует считать трассерные исследования. Данные исследования распространены на территории России и за рубежом, опыт их проведения широко освещен в публикациях [1–3]. Однако их повсеместное использование затрудняется в основном причинами экономического характера. Другим методом решения задачи оценки

взаимодействия между двумя скважинами является гидропрослушивание. Данный метод обоснован теоретически и широко используется на практике [4, 5], однако к его недостаткам следует отнести невозможность количественной оценки распределения объемов закачки, поскольку он оценивает только факт наличия или отсутствия гидродинамической связи.

Разработке косвенных способов оценки взаимного влияния скважин посвящены исследования [6–16]. Однако данные способы также не позволяют решить задачу количественной меры распределения закачки от нагнетательной скважины к добывающей.

В этой связи представляется актуальной разработка косвенного способа, позволяющего количественно оценить распределение закачиваемой в пласт воды, основанного на использовании промышленных материалов.

В данной работе предложена методика оценки распределения объемов закачки в пределах элемента системы разработки, основанная на построении многоуровневых моделей. Следует отметить, для разработки многоуровневых моделей использованы объекты разработки с различными геолого-физическими характеристиками: турнейская залежь Опалихинского

месторождения (высоковязкая нефть – 87 мПа\*с), и турнейско-фаменские залежи Гагаринского и Озерного месторождений (маловязкая нефть – 1,2 мПа\*с). Выбор данных объектов обусловлен, прежде всего, наличием опыта проведения на них массовых трассерных исследований в период с 2016 по 2018 гг. Результаты этих исследований приняты в качестве фактических при оценке достоверности разрабатываемой методики. Кроме этого, выбранные объекты можно характеризовать как полярные, с противоположными условиями нефтедобычи из карбонатных коллекторов Пермского края. К исследованию приняты добывающие и нагнетательные скважины, представляющие собой элементы системы разработки, вскрывающие одни и те же продуктивные пласты, что позволяет предположить наличие взаимосвязи между закачкой в них воды и добычей жидкости.

Известен способ оценки наличия гидродинамической связи между скважинами, основанный на корреляции (классической или ранговой) их дебитов. Так, применение метода ранговой корреляции Спирмена и Кэндалла для решения указанной задачи описывается в работе А.Х. Мирзаджанзаде [17]; также данным исследованиям посвящены работы [18–25].

По своей сути дебит скважины является показателем ее эксплуатации, или одним из дифференциальных показателей разработки. В этой связи на первом этапе разработки методики предпринята попытка скоррелировать дебиты добывающих скважин и приемистости нагнетательных. В ходе исследования ни в одном из случаев не удалось получить значимой корреляционной связи между дебитами добывающих и приемистостями нагнетательных скважин. Вероятными причинами данного явления можно считать неравномерное распределение закачки по пласту и отставание реакции добывающей скважины на изменение работы нагнетательной во времени. Таким образом, получен вывод о том, что корреляция дифференциальных показателей не позволяет оценить влияние нагнетательных скважин на работу окружающего добывающего фонда.

#### **Разработка методики оценки распределения объемов закачиваемой в пласт воды на примере Гагаринского месторождения**

В данной работе предлагается исследовать взаимодействие между добывающей и нагнетательной скважинами посредством корреляции накопленных характеристик их работы. О преимуществе накопленных (интегральных) характеристик при использовании их в статистических методах анализа процессов разработки ранее отмечено в работах [26–39]. Использование накопленных значений обеспечивает монотонный рост каждого из показателей и однозначный характер исследуемой зависимости, а также отсутствие на графике скачков, характерных при использовании дифференциальных показателей и обусловленных, в том числе, влиянием погрешностей замеров.

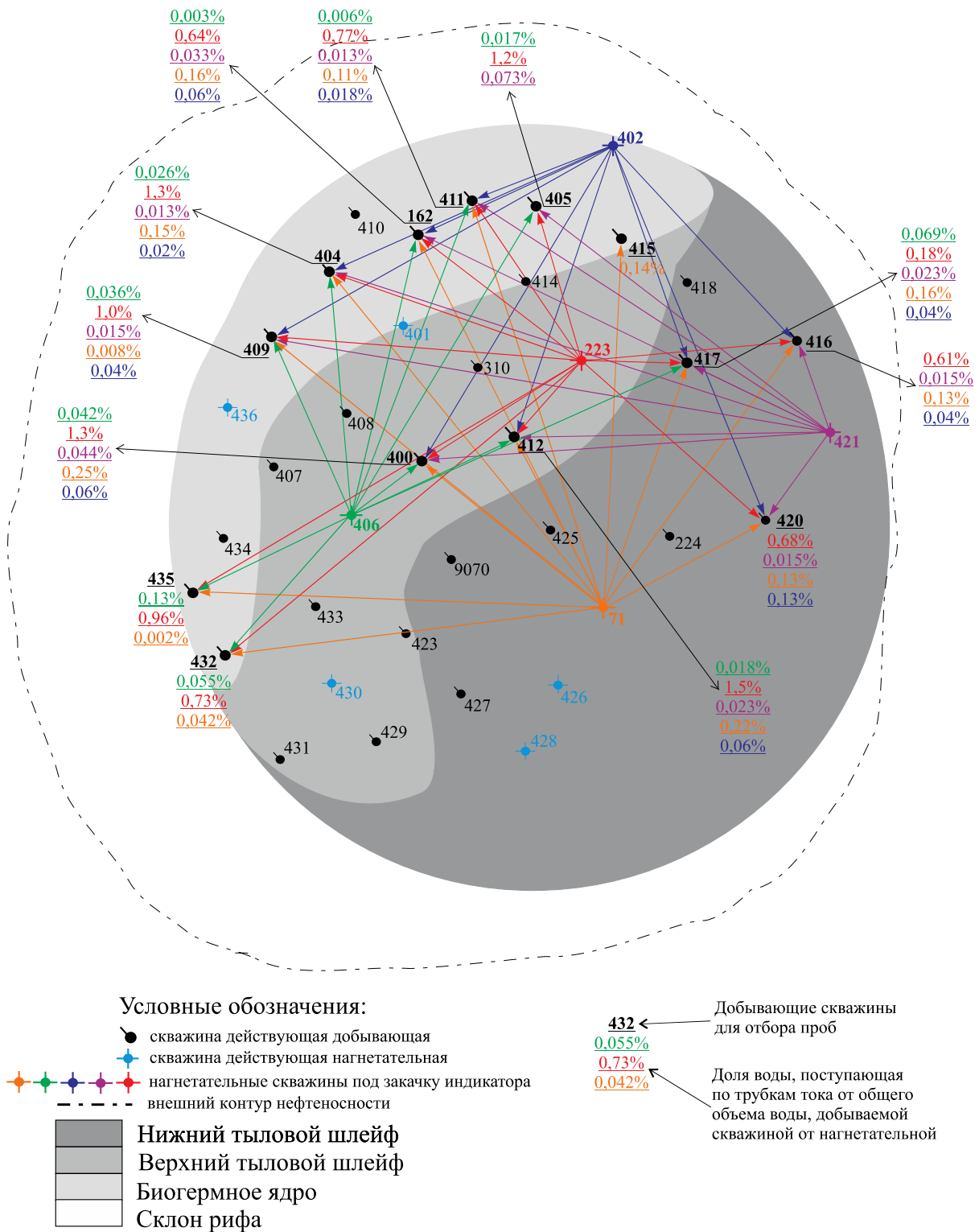
Разработка методики приводится на примере турнейско-фаменского объекта разработки Гагаринского

месторождения. В ходе проведения трассерных исследований в 2018 г. на месторождении осуществлялась закачка трассирующих агентов (нитрат натрия, карбамид, роданистый аммоний, тиомочевина, флуоресцеин натрия) в пять нагнетательных скважин (№ 71, 223, 402, 406 и 421). Отбор проб с целью обнаружения трассеров осуществлялся в течение 6 месяцев в 13 добывающих скважинах. Размещение скважин, участвовавших в трассерных исследованиях, на площади залежи отражено на рис. 1.

Для описания предлагаемой методики выбран элемент системы разработки, включающий очаг нагнетания – скважину 223, и расположенные в непосредственной близости добывающие скважины (№ 162, 400, 404, 405, 409, 411, 412, 416, 417, 420, 432, 435), работающие на тот же продуктивный пласт, целевым объектом эксплуатации всех указанных скважин является в основном продуктивная пачка Фм<sub>3</sub>.

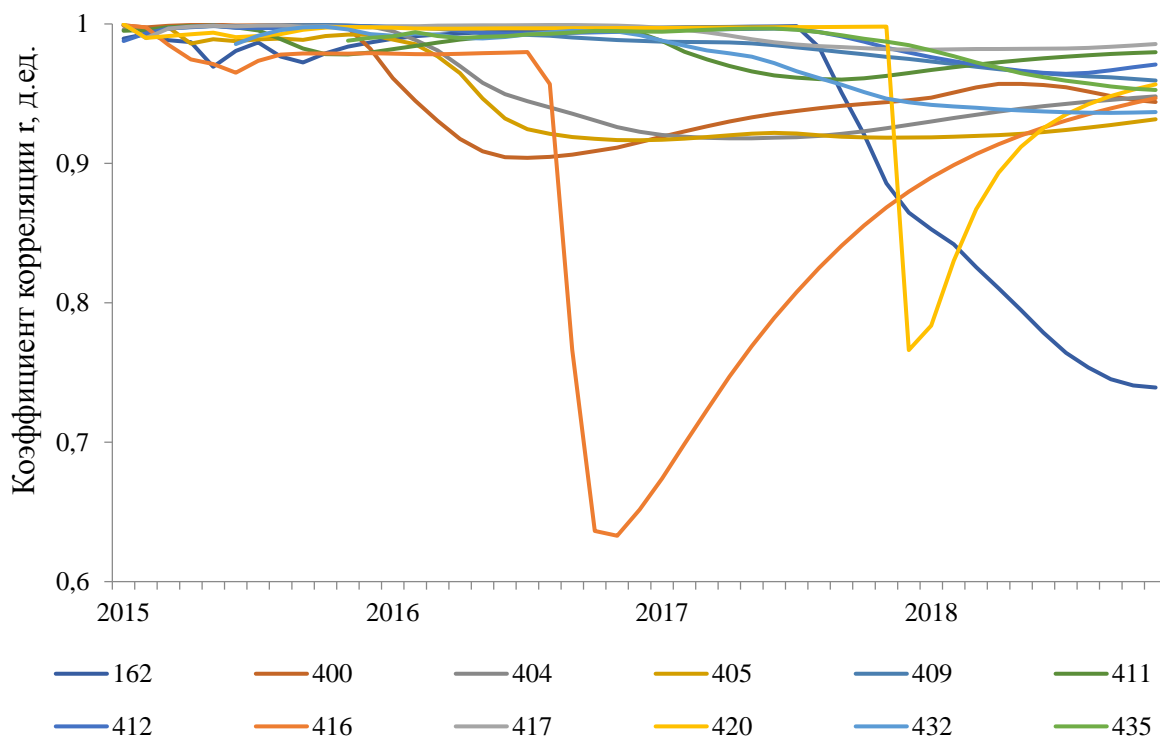
По указанным скважинам собраны и систематизированы данные по накопленным значениям закачки воды и добычи жидкости за весь период их эксплуатации. Далее построены одномерные модели – уравнения регрессии между накопленными добычей и закачкой, вычислены коэффициенты корреляции. Модели строились по данным за период с 2015 по 2018 гг., которые предварительно ранжированы в хронологическом порядке. Первая модель построена по первым трем данным (n=3), следующая – по четырем, и так далее, до n=48. Анализ поведения коэффициента корреляции данных уравнений, характеризующего соотношения между накопленной закачкой и накопленной добычей, представляет безусловный интерес. Показателем эффективности процесса закачки следует считать сначала рост, а затем стабилизацию величины коэффициента корреляции в течение всего исследуемого периода. В этой связи на рис. 2 представлена диаграмма, отражающая динамику коэффициента корреляции ( $r$ ) между накопленными закачкой и добычей.

Построенные графики зависимости накопленной добычи нефти от накопленной закачки по скв. 162, 400, 404, 405, 409, 411, 412, 416, 417, 420, 432, 435 позволили установить, что при увеличении значений  $Q_z^H$  величина  $Q_n^H$  повышается практически по линейному виду, значение  $r$  во всех случаях близко к единице, а критерий  $p=0,000000$ . Исходя из вышеприведенного анализа, можно констатировать, что влияние закачки на добычу нефти в пределах очага нагнетания скв. 223 постоянно высоко. Следовательно, все «провалы» в значениях  $r$  не являются следствием снижения эффективности закачки, носят временный характер и обуславливаются внешними факторами. Кроме того, можно отметить, что процесс заводнения для скв. 400, 416, 417 и 420 протекает сложнее, чем для других скважин. Об этом свидетельствует разница в значениях угловых и свободных членов уравнений регрессии, а также тот факт, что зависимость по скв. 162, 404, 405, 409, 411, 432 и 435 ближе к линейной, по сравнению со скв. 400, 416, 417 и 420. Уравнения регрессии, отражающие зависимость между накопленными закачкой и добычей, представлены в табл. 1.



**Рис. 1.** Схема расположения скважин на карбонатной залежи Гагаринского месторождения и влияния нагнетательных скважин на добывающие при проведении трассерных исследований

**Fig. 1.** Layout of the wells on the carbonate deposits of the Gagarinskoye field and the effect of injection wells on producing ones during tracer studies



**Рис. 2.** Динамика коэффициента корреляции между накопленной закачкой и добычей (очаг нагнетания – скважина 223 Гагаринского месторождения)

**Fig. 2.** Dynamics of the correlation coefficient between accumulated injection and production (injection center – well 223 of the Gagarinskoe field)

**Таблица 1.** Зависимости между накопленной закачкой и добычей (очаг нагнетания – скважина 223 Гагаринского месторождения)

**Table 1.** Dependencies between accumulated injection and production (injection center – well 223 of the Gagarinskoe field)

Скв. № Well	Уравнение регрессии Regression equation	Коэффициент перед $Q_3^H$ Coefficient before cumulative injection	Доля коэффициента в общей сумме, % Ratio share in the to- tal amount, %
162	$Q_H^H = 289714 + 0,0472 \cdot Q_3^H$	0,0472	5,4
400	$Q_H^H = 23165 + 0,0857 \cdot Q_3^H$	0,0857	9,9
404	$Q_H^H = 32929 + 0,116 \cdot Q_3^H$	0,1160	13,3
405	$Q_H^H = 59859 + 0,0847 \cdot Q_3^H$	0,0847	9,7
409	$Q_H^H = 18903 + 0,1649 \cdot Q_3^H$	0,1649	16,7
411	$Q_H^H = 227,73 + 0,0036 \cdot Q_3^H$	0,0036	0,4
412	$Q_H^H = 5189,2 + 0,092 \cdot Q_3^H$	0,0920	10,6
416	$Q_H^H = 25011 + 0,0381 \cdot Q_3^H$	0,0381	4,4
417	$Q_H^H = 9334,8 + 0,026 \cdot Q_3^H$	0,0260	3,0
420	$Q_H^H = 4943,9 + 0,0057 \cdot Q_3^H$	0,0057	0,7
432	$Q_H^H = 36025 + 0,1255 \cdot Q_3^H$	0,1255	12,0
435	$Q_H^H = 45304 + 0,1616 \cdot Q_3^H$	0,1616	14,0

**Анализ достоверности разработанной методики оценки распределения объемов закачиваемой в пласт воды на примере Гагаринского месторождения**

Сопоставление фактических, принятых по трасерным исследованиям и расчетных данных по распределению закачки воды от скважины 223 приведено в табл. 2.

Представленные в табл. 2 результаты подтверждают высокую степень достоверности предлагаемой

методики. Сравнительные результаты расчетов по оценке распределения объемов закачиваемой воды для всех остальных рассматриваемых скважин Гагаринского месторождения приведены в табл. 3.

Поля корреляции между фактической (Дф, %) и модельной (Дм, %) долями закачки для всех скважин Гагаринского месторождения, участвовавших в исследованиях, приведены на рис. 3. Из рис. 3. видно,



что для всех скважин наблюдаются тесные корреляции между  $D_f$  и  $D_m$ . По скважинам значения  $r$  изменяются следующим образом:  $r$  (скв. 71)=0,899;  $r$  (скв. 223)=0,596;  $r$  (скв. 402)=0,748;  $r$  (скв. 406)=0,965;  $r$  (скв. 421)=0,921. Все значения  $r$  статистически значимые. Таким образом, описанная методика оценки распределения объемов закачки по пласту демонстрирует высокую достоверность практического применения, что подтверждено материалами трассерных исследований, применительно к турнейско-фаменской залежи Гагаринского месторождения.

**Таблица 2.** Сопоставление данных трассерных исследований и разработанной методики (очаг нагнетания – скважина 223 Гагаринского месторождения)

**Table 2.** Comparison of tracer research data and the developed methodology (injection center – well 223 of the Gagarinskoe field)

Скв. № Well	Доля закачки от скважины 223 Proportion of injection from the well 223	
	Разработанная методика Developed methodology	Трассерные исследования (факт) Tracer studies (fact)
	162	5,4
400	9,9	12,0
404	13,3	12,0
405	9,7	11,0
409	16,7	9,2
411	0,4	7,1
412	10,6	13,8
416	4,4	5,6
417	3,0	1,7
420	0,7	6,3
432	12,0	6,7
435	14,0	8,8

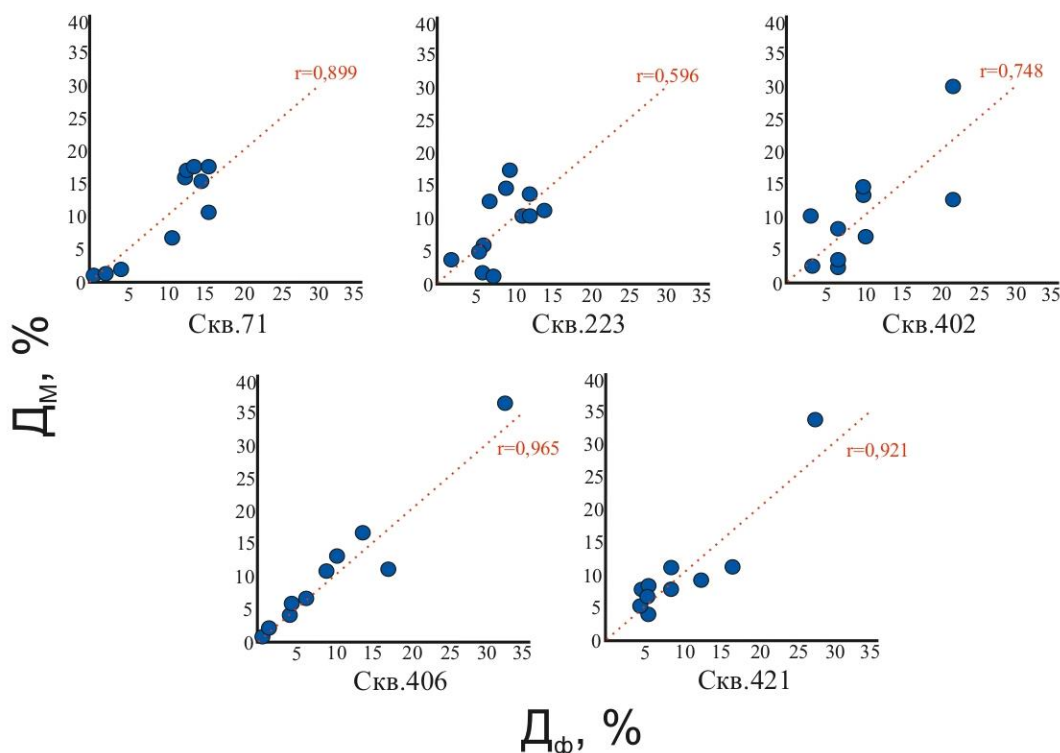
**Таблица 3.** Сопоставление данных трассерных исследований и разработанной методики для Гагаринского месторождения

**Table 3.** Comparison of tracer research data and the developed methodology for the Gagarinskoe field

Добывающая скважина Production well	Нагнетательная скважина Injection well				
	71	223	402	406	421
162	15,5*	5,9	10,0	0,7	12,4
	10,4	5,4	6,8	0,0	8,7
400	–	12,0	10,0	10,4	16,5
	–	9,9	13,9	12,2	10,8
404	14,5	12,0	3,3	6,5	4,9
	15,0	13,3	2,3	6,0	4,1
405	–	11,0	21,7	4,2	27,3
	–	9,7	29,8	3,3	33,4
409	0,8	9,2	6,7	9,0	5,6
	0,0	16,7	2,1	10,1	3,7
411	10,7	7,1	3,0	1,5	4,9
	6,4	0,4	9,7	0,8	7,4
412	–	13,8	10,0	4,5	8,6
	–	10,6	13,3	5,2	7,4
415	13,6	–	–	–	–
	17,3	–	–	–	–
416	12,6	5,6	6,7	–	5,6
	15,8	4,4	3,2	–	6,2
417	15,5	1,7	6,7	17,2	8,6
	17,5	3,0	7,9	10,5	10,8
420	12,6	6,3	21,7	–	5,6
	16,8	0,7	12,4	–	7,5
432	4,1	6,7	–	13,7	–
	0,8	12,0	–	16,1	–
435	0,2	8,8	–	32,3	–
	0,0	14,0	–	35,8	–

\*Примечание: в числителе – трассерные исследования ( $D_f$ ), в знаменателе – разработанная методика ( $D_m$ ).

\*Note: in the numerator – tracer studies ( $D_f$ ), in the denominator – the developed technique ( $D_m$ ).



**Рис. 3.** Поля корреляции по скважинам – объектам закачки трассеров Гагаринского месторождения  
**Fig. 3.** Correlation fields for wells – injection objects for tracers of the Gagarinskoe field

**Обоснование условий эффективного применения разработанной методики оценки распределения объемов закачиваемой в пласт воды**

Для детализации полученных результатов построены и проанализированы модели по трем уровням.

На первом уровне исследование произведено по всем используемым данным, по которым получена модель вида:

$$Df^{MO} = 2,641 + 0,722 Dm;$$

при  $r=0,870$ ;  $p<0,0000$ , стандартная ошибка 3,21 %.

На втором уровне исследования модели построены при использовании предварительно ранжированных данных: значения  $Df$ , полученные по данным трассерных исследований, были ранжированы от минимальных до максимальных значений. По этим данным построены уравнения регрессии по следующему принципу: первая модель построена по четырем данным ( $n=4$ ), и так далее до  $n=52$ . Всего таким образом построено 48 уравнений регрессии.

Характер изменений значений  $r$  показывает, что в диапазоне менее 7 % он изменяется хаотично, при  $Df > 7$  % наблюдается закономерное повышение его значений. Это, вероятно, свидетельствует о том, что при  $Df < 7$  % влияние накопленной закачки на накопленную добычу только начинает формироваться. При  $Df > 7$  % системы заводнения этих объектов разработки следует считать сформировавшимися и условно стационарными. Об этом достаточно убедительно на статистическом уровне свидетельствуют уравнения регрессии, приведенные в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что выполненные исследования позволили определить граничное значение влияния накопленной закачки воды на накопленную добычу жидкости и обозначить условия эффективного применения разработанной методики.

**Таблица 4.** Характеристики уравнений регрессии между фактическими и модельными долями закачки для разных диапазонов

**Table 4.** Characteristics of regression equations between actual and model injection shares for different ranges

Интервал построения моделей по $Df$ , % Interval for constructing models by $Df$ , %	Свободный член Free member of the equation	Коэффициент при $Dm$ Coefficient at $Dm$	Значения $r$ $r$ values
Диапазон 1 (модель – $Df^{M1}$ ) Range 1 (model – $Df^{M1}$ )			
0,0–7,1	3,355	0,294	0,447
Диапазон 2 (модель – $Df^{M2}$ ) Range 2 (model – $Df^{M2}$ )			
8,6–32,3	5,245	0,605	0,803

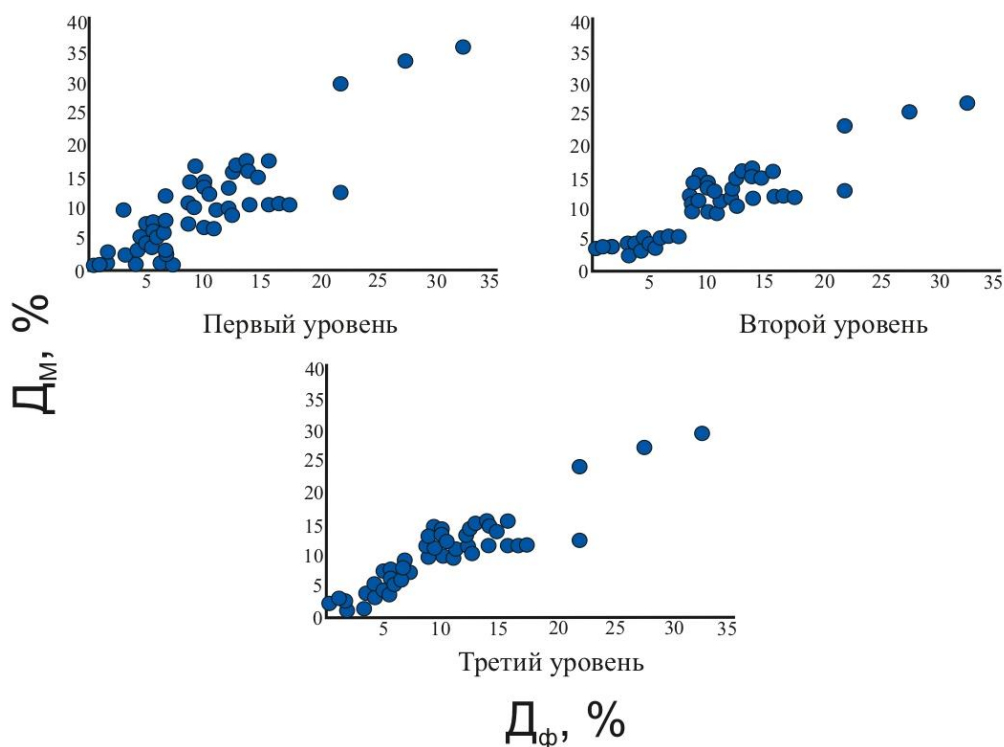
С целью комплексного использования результатов статистического моделирования построена многомерная модель третьего уровня, совместно учитывающая значения  $Df^{MO}$ ,  $Df^{M1}$  и  $Df^{M2}$ . Данная модель имеет следующий вид:

$$Df^{MM} = -21,1221 - 2,5542 Df^{MO} + 9,4049 (Df^{M1}; Df^{M2}) + 0,056 (Df^{MO})^2 + 0,3848 (Df^M) (Df^{M1}; Df^{M2}) - 0,7647 (Df^{M1}; Df^{M2})^2$$

при  $R=0,923$ ,  $p<0,0000$ , стандартная ошибка составляет 2,51 %.

Сопоставление модельных и фактических долей закачки для всех уровней исследования выполнено путем построения соответствующих полей корреляции (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что использование последовательного подхода при анализе полученных данных позволило определить возможности разработанной методики прогноза значений  $Df^M$  для Гагаринского месторождения.



**Рис. 4.** Поле корреляции между фактическими и модельными долями закачки для трех уровней анализа  
**Fig. 4.** Correlation field between actual and model injection shares for three levels of analysis

### Применение разработанной методики для условий других месторождений

В качестве примера возможности применения разработанной методики для других условий аналогичные исследования проведены также для Озерного и Опалихинского месторождений.

На Озерном месторождении (турнейско-фаменская залежь) трассерные исследования проведены в 2018 г., при этом в пять нагнетательных скважин (№ 421, 425, 459, 464 и 471) осуществлялась закачка трассирующих индикаторов (нитрит натрия, роданистый аммоний, карбамид, тиомочевина, флуоресцеин натрия). Длительность последующего отбора проб составляла 181 суток.

Аналогичные индикаторы закачивались при проведении в 2016 г. трассерных исследований на турнейской залежи Опалихинского месторождения (пять нагнетательных и 13 добывающих скважин).

По Озерному и Опалихинскому месторождениям выполнено аналогичное построение моделей для определения модельных значений долей воды–Дм.

Характер изменений значений  $r$  показывает, что для Озерного месторождения значения коэффициента в диапазоне менее 10 % изменяются хаотично, при  $Дф > 10$  % наблюдается повышение по достаточно сложной траектории. Для Опалихинского месторождения характер изменений значений  $r$  показывает, что при  $Дф < 5$  % наблюдается уменьшение значений, далее, в диапазоне 5–10 % коэффициент  $r$  изменяется незначительно. При  $Дф > 10$  % происходит закономерное повышение значений  $r$ . Это, вероятно, свидетельствует о том, что при  $Дф < 10$  % влияние накопленной закачки на накопленную добычу для этих месторождений только начинает формироваться. При  $Дф > 10$  % системы заводнения этих объектов разработки следу-

ет считать сформировавшимися и условно стационарными.

Для получения более обобщенных выводов далее выполнен совместный анализ фактических и модельных значений долей воды, полученных ранее по Озерному, Опалихинскому и Гагаринскому месторождениям.

Первоначально построена обобщающая модель (первый уровень), которая имеет следующий вид:

$$Дф^{МО} = 1,445 + 0,884 Дм$$

при  $r = 0,706$ ;  $p < 0,0000$ ; стандартная ошибка 5,80 %.

При сопоставлении фактических и модельных долей закачки для второго уровня установлено, что при  $Дф < 5$  % корреляция несколько слабее для Опалихинского месторождения, чем для Озерного и Гагаринского. При этом необходимо отметить, что, в отличие от значений, полученных по модели предыдущего уровня, здесь модельные и фактические значения доли закачки сопоставимы. При  $Дф$  в диапазоне 5–10 % корреляции между  $Дф$  и  $Дф^{М1+М2+М3}$  характеризуются достаточно близким видом. При  $Дф > 10$  % корреляции для всех трех месторождений аналогичны.

С целью комплексного использования результатов многоуровневого статистического моделирования построена многомерная модель, совместно учитывающая модели первых двух уровней. Данная модель имеет следующий вид:

$$Дф^{ММ} = -1,5433 - 1,1113 Дф^{МО} + 2,3931 (Дф^{М1}, Дф^{М2}, Дф^{М3}) + 0,0334 (Дф^{МО})^2 + 0,0249 (Дф^{М1}) (Дф^{М1}, Дф^{М2}, Дф^{М3}) - 0,0054 (Дф^{М1}, Дф^{М2}, Дф^{М3})^2$$

при  $R = 0,834$ ,  $p < 0,0000$ , стандартная ошибка составляет 4,53 %.

Поле корреляции между фактическими и рассчитанными по модели долями закачки приведено на рис. 5.

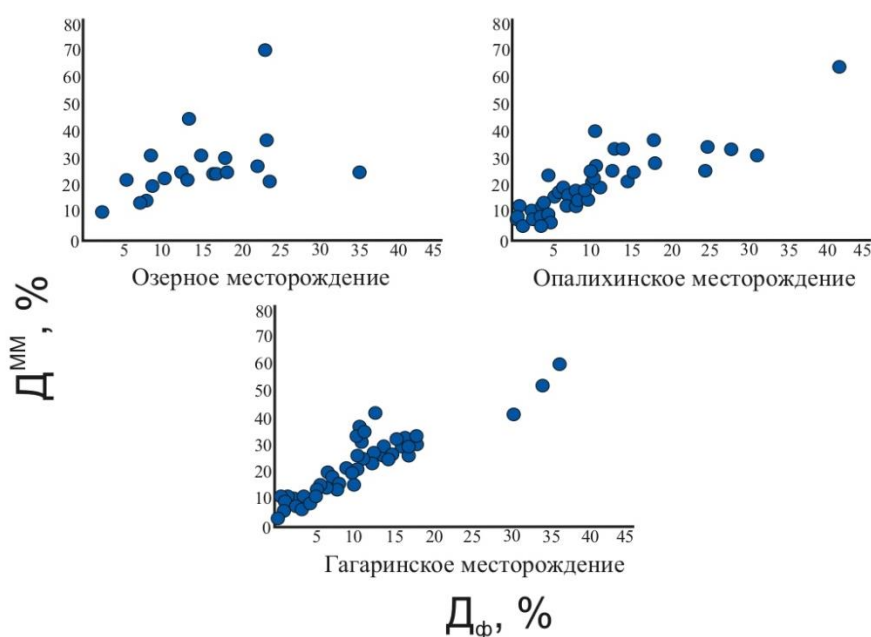


Рис. 5. Поле корреляции между фактическими и рассчитанными по модели третьего уровня долями закачки для Гагаринского, Озерного и Опалихинского месторождений

Fig. 5. Correlation field between the actual and calculated injection rate for the Gagarinskoe, Ozerное and Opalikhinskoe fields calculated using the third-level model

Из рис. 5 видно, что использование многоуровневого статистического моделирования позволило установить стадийность процесса влияния накопленной закачки на накопленную добычу жидкости, при этом использование многоуровневого статистического моделирования позволило на количественном уровне обосновать граничные значения перехода от одной стадии к другой.

#### Заключение

Целью данной работы являлось обоснование статистического способа оценки взаимодействия между нагнетательными и добывающими скважинами и распределения закачки между добывающими скважинами. В качестве объекта исследований приняты турнейско-фаменские залежи Озерного и Гагаринского месторождений, а также турнейская залежь Опалихинского месторождения, характерной особенностью которых является наличие опыта масштабных трассерных исследований, результаты которых использо-

ваны для оценки достоверности разрабатываемого, по сути, косвенного, способа.

Попытки коррелировать показатели эксплуатации (дебиты и приемистости) для оценки степени взаимодействия скважин ранее предпринимались неоднократно, но достоверных результатов при этом получено не было.

Новизна предлагаемого подхода заключается в изучении корреляции между накопленными показателями – закачкой и добычей. Его практическая реализация, выполненная на перечисленных месторождениях, продемонстрировала высокую степень схожести с результатами трассерных исследований.

Кроме того, многоуровневое статистическое моделирование позволило установить стадийность процесса влияния накопленной закачки на накопленную добычу жидкости и на количественном уровне обосновать граничные значения перехода от одной стадии к другой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация нагнетательного фонда скважин месторождения на поздней стадии разработки по результатам анализа трассерных исследований (на примере месторождения Дыш) / О.В. Савенок, Е.Н. Даценко, И.О. Орлова, Н.Н. Авакимян, П.В. Лукьяменко // Инженер-нефтяник. – 2018. – № 4. – С. 59–65.
2. Влияние поровой структуры на движение воды в породах нефтяного месторождения в заливе Бэйбу (Китай) / Р. Шен, К. Лей, Х.К. Гуо, Х.Т. Жу, Г. Жанг, Х.Б. Ли // SOCAR Proceedings. – 2017. – № 3. – С. 32–38.
3. Грачев С.И., Кривова Н.Р., Сорокин А.В. Применение индикаторных (трассерных) исследований на многопластовых месторождениях // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 5. – С. 13–15.
4. Абрамов Т.А., Исламов Д.Э., Карнаухов М.Л. Определение непроницаемости барьеров по результатам гидропрослушивания // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 12. – С. 36–41.
5. Гуляев Д.Н., Кокурина В.В., Кременецкий М.И. Анализ взаимодействия скважин по результатам мониторинга на основе секторного моделирования // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 5. – С. 82–85.
6. Исследования о наличии гидродинамической связи между терригенным бобриковским и карбонатным турнейским объектами на базе геолого-технологической модели участка месторождения / М.А. Сайфутдинов, И.Н. Хакимзянов, В.Н. Петров, Р.И. Шешдинов, Л.М. Миронова // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 1. – С. 2–8.
7. Васильев В.В. Использование результатов оценки взаимовлияния добывающих и нагнетательных скважин для оптимизации заводнения // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 6. – С. 30–32.
8. Фадеев А.П. Разработка методики оценки влияния закачки воды в пласт на добычу нефти на примере турнейских отложений Сосновского газонефтяного месторождения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 157–177.
9. Анализ интерференции скважин на основе алгоритмов комплексирования промысловых данных / А.В. Черный, И.А. Кожмякина, Н.Ю. Чуранова, А.В. Соловьев, М.М. Хайруллин, Е.В. Юдин // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 1. – С. 36–39.
10. Scattering and intrinsic attenuation as a potential tool for studying of a fractured reservoir / F. Bouchaala, M.Y. Ali, J. Matsushima et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 174. – P. 533–543.
11. Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. Обоснование систем заводнения низкопродуктивных залежей нефти в условиях ограниченного объема информации // SOCAR Proceedings. – 2019. – № 2. – С. 16–22.
12. Quantitative well placement optimization of five-spot patterns in an anisotropic oil reservoir / Weiwei Xie, Xiaodong Wang, Chen Li, Yingfang Zhou // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. – 2019. – V. 21. – № 3. – P. 333–356.
13. The petroleum system: a new classification scheme based on reservoir qualities / Jing-Zhou Zhao, Jun Li, Wei-Tao Wu, Qing Cao, Yu-Bin Bai, Chuang Er // Petroleum Science. – 2019. – V. 16. – Iss. 2. – P. 229–251.
14. Study of the relationship between fractures and highly productive shale gas zones, Longmaxi Formation, Jiaoshiba area in Eastern Sichuan / Yu-Feng Li, Wei Sun, Xi-Wu Liu, Dian Wei Zhang, Yan-Chun Wang, Zhi-Yuan Liu // Petroleum Science. – 2018. – V. 15. – Iss. 3. – P. 498–509.
15. Performance-based fractal fracture model for complex fracture network simulation / Wen-Dong Wang, Yu-Liang Su, Qi Zhang, Gang Xiang, Shi-Ming Cui // Petroleum Science. – 2018. – V. 15. – Iss. 1. – P. 126–134.
16. Mehrdad Soleimani. Naturally fractured hydrocarbon reservoir simulation by elastic fracture modeling // Petroleum Science. – 2017. – V. 14. – Iss. 2. – P. 286–301.
17. Мирзаджанзаде А.Х. Технология и техника добычи нефти. – М.: Недра, 1986. – 382 с.
18. Seyed Mohammad Mehdi Nassabeh, Afshin Davarpanah, Joata Bayrami. Simulation of low and high salinity water injection method to determine the optimum salinity // Petroleum Research. – 2019. – V. 4. – Iss. 4. – P. 348–353.
19. Zaid Alrashdi, Mohammad Sayyafzadeh. Evaluation strategy algorithm in well placement, trajectory, control and joint optimization // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 177. – P. 1042–1058.
20. Полуаналитические модели расчета интерференции скважин на базе класса моделей CRM / И.Ф. Хатмуллин, А.П. Цанда, А.М. Андрианова, С.А. Буденный, А.С. Маргарит, В.А. Лупшеев, М.В. Симонов, Д.С. Перец // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 12. – С. 38–41.
21. Experimental study on lateral flooding for enhanced oil recovery in bottom-water reservoir with high water cut / Qing You, Quanyi Wen, Jichao Fang, Min Guo // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 174. – P. 747–756.
22. Научный инжиниринг как основа процессов моделирования при разработке месторождений / М.М. Хасанов, А.Н. Ситников, А.А. Пустовских, А.П. Рошкеттаев, Н.С. Исмагилов, Г.В. Падерин, Е.В. Шель // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 142–148.
23. Experimental study of dynamic imbibition during water flooding of naturally fractured reservoirs / Behrouz Harimi, Mohsen Masihi, Abouzar Mirzaei-Paiaman, Esmaeil Hamidpour // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 174. – P. 1–13.

24. Multi-scale flow simulation in fracture-vuggy reservoirs based on pseudo-particle method / Xinrui Lyu, Hui Zhang, Zhongchun Liu, Hongfang Zhang // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. – 2018. – V. 19. – № 3. – P. 97–114.
25. Mohammad Koneshloo, Saman A. Aryana, Xiaoni Hu. The impact of geological uncertainty on primary production from a fluvial reservoir // Petroleum Science. – 2018. – V. 15. – Iss. 2. – P. 270–288.
26. Галкин В.И., Пономарева И.Н., Репина В.А. Исследование процесса нефтеизвлечения в коллекторах различного типа пустотности с использованием многомерного статистического анализа // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15. – № 19. – С. 145–154.
27. Дементьев Л.Ф. Статистические методы обработки и анализа промыслово-геологических данных. – М.: Недра, 1966. – 206 с.
28. Галкин В.И., Фадеев А.П. Анализ влияния закачки воды на добычу нефти из тульских и турнейских отложений Сосновского газонефтяного месторождения // Нефтепромысловое дело. – 2019. – № 4 (604). – С. 13–18.
29. Закиров Т.Р., Храменков М.Г. Моделирование двухфазных течений жидкостей в пористой среде в режиме доминирования капиллярных сил // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 4–12.
30. Методическое обоснование повышения выработки запасов нефти месторождений, осложненных тектоническими нарушениями / А.В. Стенькин, Ю.А. Котенев, Ш.Х. Султанов, В.Г. Уметбаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 214–223.
31. Альмухаметова Э.М. Расширение опыта применения технологии нестационарного заводнения с применением технологии изменения направления фильтрационного потока на примере месторождения Северные Бузачи // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 115–121.
32. Нешич С., Стрелецкая В.В. Интегрированный подход при обращении и обратной закачке попутно добываемой воды // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 1. – С. 25–31.
33. Haiyan Zhu, Jiadong Shen, Fengshou Zhang. A fracture conductivity model for channel fracturing and its implementation with Discrete Element Method // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 172. – P. 149–161.
34. Abdolmohsen Shabib-Asl, Mohammed Abdalla Ayoub, Khaled Abdalla Elraies. A new hybrid technique using low salinity water injection and foam flooding for enhanced oil recovery in sandstone rock // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 174. – P. 716–728.
35. Youwei He, Shiqing Cheng, Jiazheng Qin. Interference testing model of multiply fractured horizontal well multiple injection wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 176. – P. 1106–1120.
36. Грачев С.И., Коротенко В.А., Кушакова Н.П. Исследование трансформации двухфазной фильтрации на формирование зон невыработанных запасов нефти // Записки горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 68–82.
37. Ghareb Hamada, Veronique Joseph. Developed correlations between sound wave velocity and porosity, permeability and mechanical properties of sandstone core samples // Petroleum Research. – 2020. – V. 5. – Iss. 4. – P. 326–338.
38. Гидродинамические особенности нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, С.В. Рыжков // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 4. – С. 85–94.
39. Shedid A. Shedid Vertical-horizontal permeability correlations using coring data // Egyptian Journal of Petroleum. – 2019. – V. 28. – Iss. 1. – P. 97–101.

Поступила 13.01.2021 г.

#### Информация об авторах

**Пономарева И.Н.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Мартюшев Д.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Черный К.А.**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC622.276

## RESEARCH OF INTERACTION BETWEEN EXPRESSIVE AND PRODUCING WELLS BASED ON CONSTRUCTION OF MULTILEVEL MODELS

Inna N. Ponomareva<sup>1</sup>,  
permpolitech@gmail.com

Dmitriy A. Martyushev<sup>1</sup>,  
martyushevdi@inbox.ru

Konstantin A. Cherny<sup>1</sup>,  
sms@pstu.ru

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance** of the study is caused by hydrodynamic relation between the injection and production wells is the most important condition for the full development of reserves. Studying the patterns of distribution of injection volumes within its target facility is the most important task of monitoring its development. To date, oil, and gas companies for these purposes use methods of hydraulic monitoring and indicator research. These methods can most accurately assess the direction of movement of the filtration flows, but due to the high cost and duration of these studies they are not often carried out in the Perm Krai fields. The paper proposes to evaluate the distribution of injection volumes within the element of the development system by correlating the accumulated characteristics of their work.

**The main aim** of the study is to develop an indirect method for quantifying the distribution of water injected into the formation based on the use of field materials.

**Object:** carbonate deposits of the Gagarinskoe, Ozernoe and Opalikhinskoe oil fields.

**Methods:** geological and field research, correlation analysis.

**Results.** Multilevel statistical modeling made it possible to establish the stage-by-stage process of the effect of cumulative injection on accumulated fluid production and to substantiate at a quantitative level the boundary values of the transition from one stage to another. The analysis of the dynamics of the correlation coefficient between the accumulated values of water injection and fluid production allowed us to establish qualitative indicators of the waterflooding system within the considered element of the development system. The obtained qualitative indicators of the waterflooding system demonstrate high reliability of practical application, which is confirmed by the materials of tracer studies, as applied to the carbonate deposits of the Gagarinskoe, Ozernoe and Opalikhinskoe oil fields.

### Key words:

Reservoir pressure maintenance system, development of oil reserves, tracer studies, hydraulic listening, oil production, agent injection, statistical methods.

### REFERENCES

- Savenok O.V., Datsenko E.N., Orlova I.O., Avakimyan N.N., Lukyamenko P.V. Optimization of injection wells fund deposits at a late stage of development as a result of tracer test analysis (for example, deposits Dis). *Petroleum Engineers*, 2018, no. 4, pp. 59–65. In Rus.
- Shen R., Lei X., Guo H.K., Zhou H.T., Zhang Q., Li H.B. The influence of pore structure on water flow in rocks from the Beibu Gulf oil field in China, *SOCAR Proceedings*, 2017, no. 3, pp. 32–38. In Rus.
- Grachev S.I., Krivova N.R., Sorokin A.V. The use of indicator (tracer) studies in multilayer fields. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2008, no. 5, pp. 13–15. In Rus.
- Abramov T.A., Islamov D.E., Karnaukhov M.L. Karnaukhov Determination of barrier impermeability based on the results of hydraulic listening. *Oilfield business*, 2013, no. 12, pp. 36–41. In Rus.
- Gulyaev D.N., Kokurina V.V., Kremenitsky M.I. Analysis of well interference according to monitoring results based on sector modeling. *Oil industry*, 2012, no. 5, pp. 82–85. In Rus.
- Sayfutdinov M.A., Khakimzyanov I.N., Petrov V.N., Sheshdirov R.I., Mironova L.M. Studies on the presence of a hydrodynamic connection between the terrigenous Bobrikovsky and carbonate Tournaisian objects based on the geological and technological model of the field site. *Geosursy=Georesources*, 2018, vol. 20 (1), pp. 2–8. In Rus.
- Vasiliev V.V. Using the results of evaluating the mutual influence of production and injection wells to optimize water flooding. *Oil industry*, 2009, no. 6, pp. 30–32. In Rus.
- Fadeev A.P. Development of a methodology for assessing the effect of water injection into the reservoir on oil production using the example of Tournaisian deposits of the Sosnovskoye gas and oil field. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 157–177. In Rus.
- Chorny A.V., Kozhemyakina I.A., Churanova N.Yu., Soloviev A.V., Khayrullin M.M., Yudin E.V. Well interference analysis based on field data integration algorithms. *Oil industry*, 2019, no. 1, pp. 36–39. In Rus.
- Bouchaala F., Ali M.Y., Matsushima J. Scattering and intrinsic attenuation as a potential tool for studying of a fractured reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 533–543.
- Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Substantiation of waterflooding systems for low-productive oil deposits in a limited amount of information. *SOCAR Proceedings*, 2019, no. 2, pp. 16–22. In Rus.
- Weiwei Xie, Xiaodong Wang, Chen Li, Yingfang Zhou. Quantitative well placement optimisation of five-spot patterns in an anisotropic oil reservoir. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 333–356.
- Jing-Zhou Zhao, Jun Li, Wei-Tao Wu, Qing Cao, Yu-Bin Bai, Chuang Er. The petroleum system: a new classification scheme based on reservoir qualities. *Petroleum Science*, 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 229–251.
- Yu-Feng Li, Wei Sun, Xi-Wu Liu, Dian Wei Zhang, Yan-Chun Wang, Zhi-Yuan Liu. Study of the relationship between fractures and highly productive shale gas zones, Longmaxi Formation, Jiaoshiba area in Eastern Sichuan. *Petroleum Science*, 2018, vol. 15, Iss. 3, pp. 498–509.
- Wen-Dong Wang, Yu-Liang Su, Qi Zhang, Gang Xiang, Shi-Ming Cui. Performance-based fractal fracture model for complex fracture network simulation. *Petroleum Science*, 2018, vol. 15, Iss. 1, pp. 126–134.

16. Mehrdad Soleimani. Naturally fractured hydrocarbon reservoir simulation by elastic fracture modeling. *Petroleum Science*, 2017, vol. 14, Iss. 2, pp. 286–301.
17. Mirzadzhanzade A.Kh. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefi* [Technology and technique of oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 382 p.
18. Seyed Mohammad Mehdi Nassabeh, Afshin Davarpanah, Joata Bayrami. Simulation of low and high salinity water injection method to determine the optimum salinity. *Petroleum Research*, 2019, vol. 4, Iss. 4, pp. 348–353.
19. Zaid Alrashdi, Mohammad Sayyafzadeh. Evaluation strategy algorithm in well placement, trajectory, control, and joint optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 177, pp. 1042–1058.
20. Khatmullin I.F., Tsanda A.P., Andrianova A.M., Budenny S.A., Margarit A.S., Lupsheev V.A., Simonov M.V., Perets D.S. Semi-analytical models for calculating well interference based on the class of CRM models. *Oil industry*, 2018, no. 12, pp. 38–41. In Rus.
21. Qing You, Quanyi Wen, Jichao Fang, Min Guo. Experimental study on lateral flooding for enhanced oil recovery in bottom-water reservoir with high water cut. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 747–756.
22. Khasanov M.M., Sitnikov A.N., Pustovskikh A.A., Roshchektaev A.P., Ismagilov N.S., Paderin G.V., Shel E.V. Scientific engineering as the basis of modeling processes in the development of deposits. *Georesursy=Georesources*, 2018, vol. 20 (3), pp. 142–148. In Rus.
23. Behrouz Harimi, Mohsen Masihi, Abouzar Mirzaei-Paiaman, Esmaeil Hamidpour. Experimental study of dynamic imbibition during water flooding of naturally fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 1–13.
24. Xinrui Lyu, Hui Zhang, Zhongchun Liu, Hongfang Zhang. Multi-scale flow simulation in fracture-vuggy reservoirs based on pseudo-particle method. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 97–114.
25. Mohammad Koneshloo, Saman A. Aryana, Xiaoni Hu. The impact of geological uncertainty on primary production from a fluvial reservoir. *Petroleum Science*, 2018, vol. 15, Iss. 2, pp. 270–288.
26. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Repin V.A. Investigation of the process of oil recovery in reservoirs of various types of voidness using multivariate statistical analysis. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 145–154. In Rus.
27. Dementiev L.F. *Statisticheskie metody obrabotki i analiza promyslovo-geologicheskikh dannyykh* [Statistical methods for processing and analyzing field geological data]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 206 p.
28. Galkin V.I., Fadeev A.P. Analysis of the effect of water injection on oil production from the Tula and Tournaisian deposits of the Sosnovskoye oil and gas field. *Oilfield business*, 2019, no. 4 (604), pp. 13–18. In Rus.
29. Zakirov T.R., Khramchenkov M.G. Pore-scale investigation of the displacement fluid mechanics during two-phase flows in natural porous media under the dominance of capillary forces. *Georesursy*, 2020, vol. 22 (1), pp. 4–12. In Rus.
30. Stenkin A.V., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh., Umetbaev V.G. Methodological rationale for increasing the production of oil reserves in deposits complicated by tectonic disturbances. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 214–223. In Rus.
31. Almukhametova E.M. Extending the experience of applying the technology of non-stationary waterflooding using the technology of changing the direction of the filtration flow using the example of the North Buzachi field. *Georesursy=Georesources*, 2018, vol. 20 (2), pp. 115–121. In Rus.
32. Neshich S., Streletskaya V.V. An integrated approach for handling and reverse injection of produced water. *Georesursy=Georesources*, 2018, vol. 20 (1), pp. 25–31. In Rus.
33. Haiyan Zhu, Jiadong Shen, Fengshou Zhang. A fracture conductivity model for channel fracturing and its implementation with Discrete Element Method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 172, pp. 149–161.
34. Abdolmohsen Shabib-Asl, Mohammed Abdalla Ayoub, Khaled Abdalla Elraies. A new hybrid technique using low salinity water injection and foam flooding for enhanced oil recovery in sandstone rock. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 716–728.
35. Youwei He, Shiqing Cheng, Jiazheng Qin. Interference testing model of multiply fractured horizontal well multiple injection wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 176, pp. 1106–1120.
36. Grachev S.I., Korotenko V.A., Kushakova N.P. Investigation of the transformation of two-phase filtration into the formation of zones of undeveloped oil reserves. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 68–82. In Rus.
37. Ghareb Hamada, Veronique Joseph. Developed correlations between sound wave velocity and porosity, permeability and mechanical properties of sandstone core samples. *Petroleum Research*, 2020, vol. 5, Iss. 4, pp. 326–338.
38. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Ryzhkova S.V. Hydrodynamic features of oil and gas bearing deposits of the southern areas of Ob-Irtysh interfluves. *Georesursy*, 2019, vol. 21 (4), pp. 75–94. In Rus.
39. Shedid A. Shedid. Vertical-horizontal permeability correlations using coring data. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2019, vol. 28, Iss. 1, pp. 97–101.

*Received: 13 January 2021.*

#### Information about the authors

**Inna N. Ponomareva**, Dr. Sc., professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Dmitriy A. Martuyushev**, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Konstantin A. Cherny**, Dr. Sc., head of the department, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 630.61

## АНАЛИЗ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА ЛЕСНОГО ФОНДА

Пасько Ольга Анатольевна<sup>1</sup>,  
pasko@agrophys.ru

Захарченко Александр Викторович<sup>2</sup>,  
zakh.al.vic@yandex.ru

Ковязин Василий Федорович<sup>3</sup>,  
vfkedr@mail.ru

<sup>1</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт,  
Россия, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14.

<sup>2</sup> Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

**Актуальность** исследования связана с приоритетным вниманием государства к использованию леса в качестве главного воспроизводимого природного ресурса России.

**Цель:** анализ сложившегося пространственного деления земель лесного фонда.

**Объекты:** земли лесного фонда Томской области, разбитые на районы, лесничества и участковые лесничества по принципу трехуровневого иерархического деления

**Методы:** абстрактно-логический, аналитический и математического моделирования. Рабочая гипотеза предполагает, что площадь лесных участков зависит от значения единицы масштаба по степенному закону, а коэффициент при логарифме функции отражает диапазон изменения масштабной размерности. Впервые использована проблема изменяющегося масштаба применительно к анализу землеустройства лесничества.

**Результаты.** Изучена иерархическая структура территориального деления земель лесного фонда. В целом площади участковых лесничеств Томской области меняются в пределах 282–2332087 га. Однофакторный дисперсионный анализ площадей показывает низкую, менее 1 %, вероятность нулевой гипотезы. Построенный на следующем этапе исследования профиль желательности выявил критическое значение средней площади, равной 71255 га, которому участки соответствуют с вероятностью 63 %. Закономерности распределения суммарной площади лесов по лесничествам отличаются от нормального. Ее генеральное среднее значение равно 175000 га, площади хвойных лесов по лесничествам – 6000 га, лиственных лесов – 11000 га. В целом площади хвойных лесов по лесничествам не превышают 8000 га, лиственных сосредоточены в диапазоне 4000–10000 и 16000–20000 га. Также неоднородно распределение запаса древесины. Суммарная площадь лесов по лесничествам распределена неравномерно, ее распределение близко к логнормальной модели. Наибольшее число площадей лесничеств сосредоточено в интервале до 15 тыс. га. Очень редко встречаются крупные участки (более 30 тыс. га). Высока фрагментарность хвойных лесов. Модальный размер участка составляет от двух до четырех тысяч гектаров. Крупные массивы леса встречаются достаточно редко. Распределение площадей лиственных лесов полимодально и разделяется на три части: до 2 тыс. га, 4–120 тыс. га, 14–20 тыс. га, что указывает на наличие лесов малых и средних площадей, а также крупных лесных массивов. Один массив леса относится к очень крупному (более 32 тыс. га). Суммарный запас древесины сосредоточен в интервале от 0 до 2000 м<sup>3</sup>. Модальное значение располагается в интервале от 1500 до 2000 м<sup>3</sup>. Отмечен интервал 3000–3500 м<sup>3</sup>. В единичных случаях выявлены очень высокие запасы древесины (5500 м<sup>3</sup>). Запас древесины лиственных лесов, как и в случае с площадями, полимодален. Выделяется модальный интервал с очень низким запасом древесины – порядка 200–400 м<sup>3</sup>. Редки случаи среднего запаса от 2000 до 3600 м<sup>3</sup>. Установлена логарифмическая зависимость площади лесничества от порядкового номера выдела в упорядоченной по убыванию площади последовательности лесничеств. Коэффициент при логарифме зависит от группы лесничеств (очень большие, большие, средние, малые). Аналогичная закономерность показана для участковых лесничеств. Установлено явное нарушение иерархии пространственного деления при выделении малых лесничеств, объяснимое экономической причиной. Иерархический анализ структуры естественной агрегации лесничеств по площади показал наличие пяти вложенных уровней неоднородности и, соответственно, пяти групп кластеров. В зависимости от уровня разделения в кластерном анализе выделяются девять иерархических уровней площадных размеров лесничеств, а уровень их раздела пропорционален масштабу – чем меньше, тем крупнее масштаб исследования. Это должно отражаться в информации о состоянии лесничеств кластеров С1–С3 (очень крупные и крупные) и С4, С5 (средне- и мелко-размерные) для выработки эффективных управленческих решений.

**Ключевые слова:**

Лесной фонд, МАУР, лесничества, площадь, иерархическое деление.

### Введение

Актуальность темы исследования определяется ценностью леса как основного воспроизводимого природного ресурса России [1].

Устойчивое лесопользование предполагает использование лесов и лесных площадей способами и интенсивностью [2], которые в полной мере обеспечивают сохранение биологического разнообразия,



жизнеспособности, продуктивности и способности к самовозобновлению [3]. Основой освоения лесов [4], их охраны [5] и оценки [6] является лесное планирование. При его проведении учитывают комплекс параметров, в первую очередь, особенность структуры леса и лесорастительные условия; перспективы развития инфраструктуры при непрерывном пользовании древесиной и экономическую доступность лесных ресурсов [7].

В Лесном кодексе предусмотрены четыре уровня лесного планирования: федеральный (государственная инвентаризация лесов), региональный (лесной план субъекта РФ), лесничества или лесопарка (лесохозяйственный регламент) и лесного участка, переданного в лесопользование (проект освоения лесов) [8].

Использование лесного фонда предполагает межование лесных земель на кварталы, участковые и районные лесничества. При разделении этих хозяйственных единиц учитывают наличие действующих и проектируемых объектов инфраструктуры лесодобычи и деревообработки. Структуру пространственной организации лесных земель устанавливают с учетом их зонирования по планируемому освоению, видам использования и объему вырубаемой спелой древесины.

Базовые принципы территориального планирования лесного фонда регламентирует Лесостроительная инструкция [9], которая определяет размер лесного квартала, средний размер лесотаксационного выдела и т. д. Учитывается комплекс организационно-технических показателей, отражающих фрагментарность лесного массива: минимальная площадь спелого леса среди молодняка, не покрытые лесом земли; наличие дорог, просек, сенокосов, линий электропередач и других нелесных земель, а также неиспользуемые земли.

Для учета лесных земель и проведения таксационных и лесохозяйственных работ лесной фонд лесничества разделяют на кварталы, площадью 25–3000 га, в зависимости от категории лесов [10], каждый лесной квартал – на лесотаксационные выделы, относительно однородные по почвенно-грунтовым условиям произрастания, возрасту и составу древесной растительности.

Такое межование земель лесного фонда позволяет проводить в лесном квартале комплекс мероприятий по использованию, охране, защите и воспроизводству лесов в пределах нормативных допусков [11].

В международной практике лесопользования широко используют геоинформационные системы, дистанционное зондирование Земли [12, 13] и статистический анализ данных. Особое внимание уделяют надежности получаемой информации. Так, в Европейском Союзе для сравнительного анализа систем территориального управления и пространственного планирования лесных земель применяют исследование на основе метода MAUP (Modifiable Areal Unit Problem – проблема изменяющегося масштаба) [14]. Исследования проходят в рамках международной программы ESPON 2020 [15] и касаются таких сфер, как кадастр [16], градостроительство [17], сельскохо-

зяйственное производство [18, 19], здравоохранение [20–23], демография [24], туризм [25], экология [26, 27] и др.

Метод MAUP разработан в ходе решения проблемы агрегации данных [28], вызванной спецификой пространственного деления земель и масштабом исследования. Установлена зависимость среднеарифметических и среднеквадратических значений параметров системы от масштаба исследования и формы разбиения земель [29]. Признание чувствительности результатов пространственного анализа к выбору единиц измерения данных имеет решающее значение для характеристики территорий с минимальным смещением и позволяет избегать ложных взаимосвязей и противоречивых результатов.

Естественные процессы в виде вложенных циклов неоднородности определяют естественную иерархическую структуру географического пространства. Например, вейвлет-анализ мощности верхнего почвенного горизонта траншеи [30] и колебаний температуры поверхностных слоев выявил несколько иерархических уровней сложно увязанных между собой волн [31], являющихся причиной случайности изучаемых явлений.

Что касается лесопользования, следует иметь в виду уникальность ландшафтно-географических, территориальных и экономических условий, сложившихся в регионах, которые влияют на территориальное деление лесных земель для их эффективного воспроизводства, охраны и защиты [32]. Соответственно, уникальна иерархическая структура управления лесопользованием и региональное территориальное деление земель лесного фонда. Многомасштабность размеров структурных единиц лесного фонда обусловлена объективными и случайными факторами. Она вызывает появление проблемы MAUP как источника статистической погрешности, способной существенно влиять на результаты проверки статистических гипотез.

Целью работы является анализ землеустройства лесного фонда с учетом деления территории на два уровня управления: кварталы и участковые лесничества.

Научная новизна заключается в разработке методического подхода к выявлению иерархической структуры управления лесопользованием и агрегации пространственной информации.

В статье проведен пространственный автокорреляционный анализ территориальных параметров лесного фонда для показа возможностей влияния MAUP на результаты лесопользования. Рассмотрено пространственное соответствие двух уровней иерархической организации земель лесного фонда – районные лесничества (первый уровень) и составляющие территорию лесничества (второй уровень) [33].

Практический смысл исследования заключается в сравнении традиционного статистического подхода с учетом и без учета MAUP к сложившемуся распределению земельных участков лесного фонда разных иерархических уровней.

### Материалы и методики исследования

Объектом исследования служат земли лесного фонда Томской области (рис. 1), разбитые на административные районы, районные и участковые лесничества по принципу трехуровневого иерархического деления. Предмет исследования – пространственные характеристики 75 участковых лесничества, расположенных в 26 районных лесничествах и в 17 административных районах Томской области.

В качестве исходного материала использованы данные сайта Департамента лесного хозяйства Томской области [34].

Проведен анализ легитимности такого территориального деления и соотношения иерархических уровней в зависимости от масштаба [33]. Использован

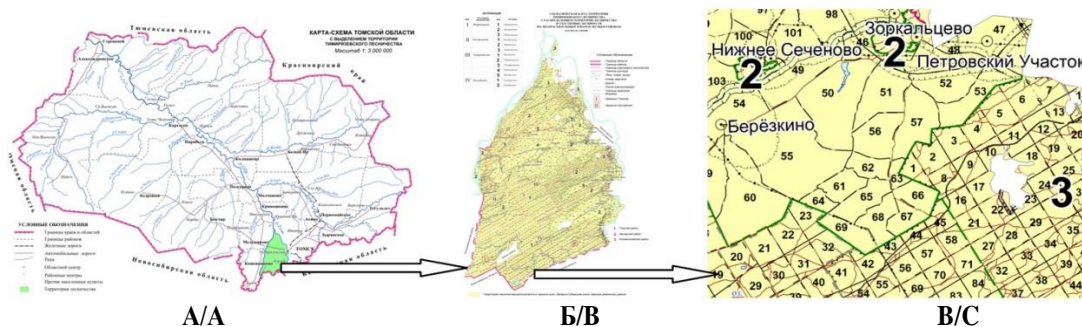
иерархический кластерный анализ площадей лесничеств на основе расчета евклидова расстояния.

Применен комплекс методов, включающий абстрактно-логический, аналитический, картографический и метод математического моделирования [35, 36]. С помощью программного пакета Statistica проверена вероятность нуль-гипотезы о случайном характере территориального деления площадей лесничеств, расположенных на территории Томской области. Рабочая гипотеза предполагает, что площадь лесных участков зависит от значения единицы масштаба по степенному закону, а коэффициент при логарифме функции отражает диапазон изменения масштабной размерности.

Таблица 1. Пространственное деление лесных земель Томской области

Table 1. Spatial division of forest lands in the Tomsk region

Административный район Administrative district	Районное лесничество Regional forestry	Участковое лесничество Local forestry	Общая площадь, га Total area, ha	
Александровский Alexandrovsky	Александровское Alexandrovskoe	Александровское/Alexandrovskoe	2332087	
		Стрежевское/Strezhevskoe	260587	
...	...	...	...	
Каргасокский/Kargasoksky	Васюганское /Vasyuganskoe	Васюганское/Vasyuganskoe	2983376	
Верхнекетский Verkhneketsky	Верхнекетское Verkhneketskoe	Катайгинское/Kataiginskoe	676175	
		Максимоярское/Maksimoyarskoe	523972	
		Клюквинское/Klyukvinskoe	286376	
		Дружининское/Druzhninskoe	891171	
		Лисицинское/Lisitsinskoe	1316889	
		Белоярское/Beloyarskoe	331660	
Зырянский Zyryansky	Зырянское/Zyryanskoe	Зырянское/Zyryanskoe	51047	
	Каргасокское Kargasokskoe	Окунеевское/Okuneevskoe	140529	
Каргасокский Kargasoksky	Каргасокское Kargasokskoe	Чердатское/Cherdatskoe	66739	
		Большегривское/Bolshegrivskoe	247639	
		Верх-Тымское/Verkhne-Tymskoe	2325120	
		Каргасокское/Kargasokskoe	718345	
		Нюрольское/Nyurolskoe	582993	
		Тевризское/Tevrizskoe	602716	
		Тымское/Tymskoe	270166	
Чижапское/Chizhapskoe	675818			
...	...	...	...	
Молчановский Molchanovsky	Асиновское/Asinovskoe	Батуриновское/Baturinskoe	27994	
	Кривошеинское/Krivosheinskoe	Красноярское/Krasnoyarskoe	34393	
	Асиновское/Asinovskoe	Батуриновское/Baturinskoe	27994	
	Молчановское Molchanovskoe	Молчановское/Molchanovskoe	Молчановское/Molchanovskoe	136279
		Сулзатское/Sulzatskoe	Сулзатское/Sulzatskoe	130703
		Суйгинское/Suiginskoe	Суйгинское/Suiginskoe	162503
		Елтыревское/Eltyrevskoe	Елтыревское/Eltyrevskoe	728578
Улу-Юльское/Ulu-Yulskoe	Шудельское/Shudelskoe	533660		
Улу-Юльское/Ulu-Yulskoe	Улу-Юльское/Ulu-Yulskoe	60650		
...	...	...	...	
Томский Tomsky	Корниловское Kornilovskoe	Томско-Обское/Tomsko-Obskoe	45962	
		Егоровское/Egorovskoe	124778	
		Прикульское/Prikulskoe	58401	
		Северо-Алтайское/Severo-Altayskoe	72779	
	Кривошеинское/Krivosheinskoe	Корниловское/Kornilovskoe	54355	
		Красноярское/Krasnoyarskoe	58099	
	Тимирязевское Timiryazevskoe	Моряковское/Moryakovskoe	38364	
		Богородское/Bogorodskoe	29752	
		Темерчинское/Temerchinskoe	79798	
	Томское Tomskoe	Калтайское/Kaltayskoe	96595	
Богашевское/Bogashevskoe		34381		
Межениновское/Mezheninovskoe	19230			
...	...	...	...	
Шегарский Shegarsky	Шегарское/Shegarskoe	Шегарское/Shegarskoe	124903	
		Иловское/Ilovskoe	184986	



**Рис. 1.** Пример иерархической организации земель лесного фонда Томской области: А) положение Тимирязевского районного лесничества на карте области; Б) его схема; В) фрагмент лесных земель с указанием урочищ и лесных кварталов [34]

**Fig. 1.** Example of hierarchical organization of forest lands in the Tomsk region: A) position of Timiryazevsky district forestry on the map of the region; B) its scheme; C) fragment of forest land indicating tracts and forest blocks [34]

### Результаты исследования и обсуждение

Предварительный анализ размеров, форм и географического положения лесничеств показывает, что осью симметрии по отношению к форме выделов является река Обь. С продвижением на северо-запад, запад и восток от областного центра (г. Томск) размеры лесничеств увеличиваются, а форма вытягивается.

В ходе анализа выявлена иерархическая структура территориального деления земель лесного фонда (табл. 1). Территории некоторых лесничеств расположены либо в одном административном районе, либо сразу в нескольких. Имеются лесничества с большим числом лесных участков (Каргасокское, Верхнекетское и Тимирязевское) и с одним–двумя участками (Васюганское, Зырянское, Александровское и Томское). Северные лесничества, например, Васюганское и Александровское, имеют большую площадь земель, но поделены на один–два участка в связи с труднодоступностью и заболоченностью территории.

Однофакторный дисперсионный анализ площадей показывает низкую, менее 1 %, вероятность нулевой гипотезы. Проверена альтернативная гипотеза о том, что распределение площадей по участкам лесничеств не случайно. Изучен расчетный объем изъятия древесины по лесничеству как фактор, учитываемый при разбиении территории. Показана неоднородность распределения по всем изученным параметрам (рис. 2). Средняя площадь лесничества с вероятностью 63 % равна 71255 га.

Распределение частоты встречаемости значений суммарной площади лесов в лесничестве значительно отличается от нормального распределения (рис. 2, А). Среднее значение суммарной площади лесов составляет 175000 га; площади лесничества – не более 15000 га. Генеральное среднее значение площади хвойных лесов равно 6000 га (рис. 2, Б), лиственных – 11000 га (рис. 2, В). Основная площадь хвойных древостоев по лесничествам не превышает 8000 га, лиственных древостоев находится в интервалах 4000–10000 и 16000–20000 га. Распределение частоты встречаемости запаса древесины также крайне неоднородно.

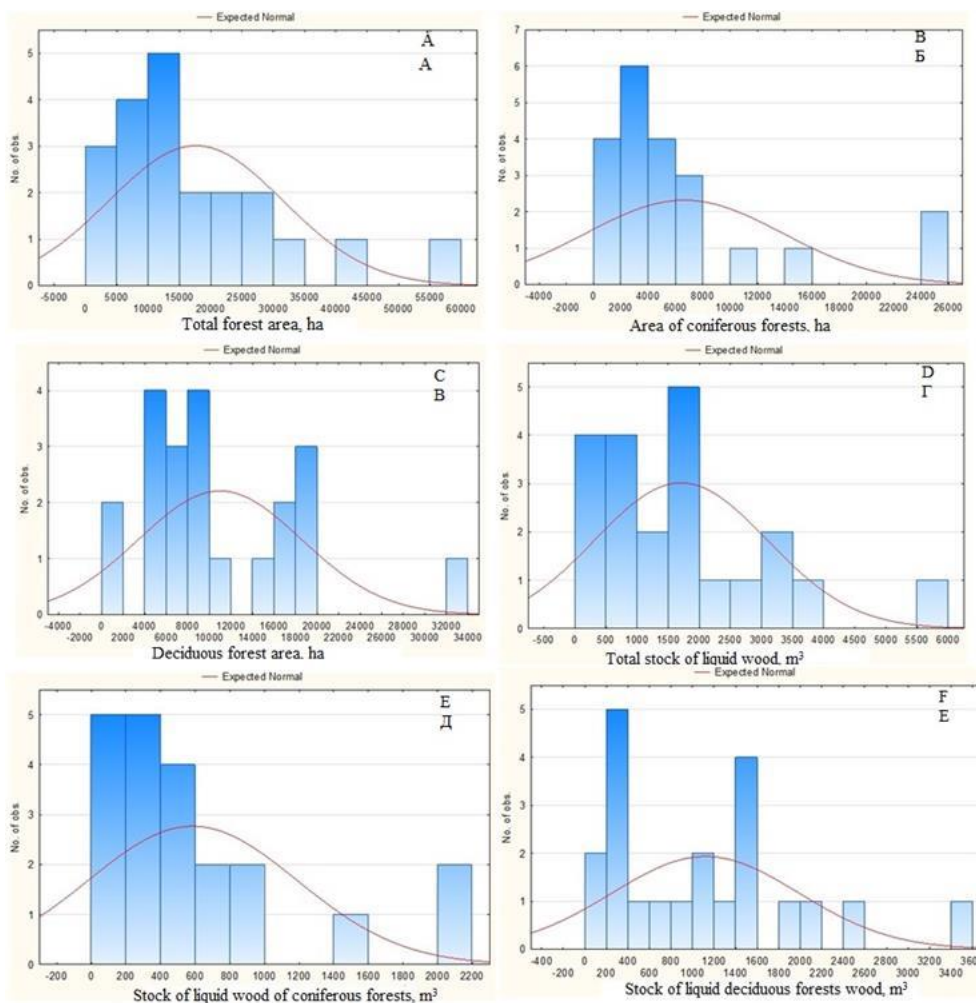
Распределение суммарной площади лесничеств близко к логнормальной модели (рис. 2, А): максимум значений находится в интервале до 15 тыс. га; единичны участки леса более 30 тыс. га. Высока

фрагментарность площадей хвойных лесов (рис. 2, Б); модальный размер участка составляет от двух до четырех тысяч гектаров; крупные массивы леса встречаются редко. Распределение значений площади лиственных лесов полимодально (рис. 2, В) и разделяется на три части: до двух тыс. га, 4–120 тыс. га, 14–20 тыс. га. Это указывает на наличие лесных участков малых, средних и больших площадей; один массив леса является очень крупным (более 32 тыс. га).

Суммарный запас древесины в лесничестве (рис. 2, Д) в среднем не превышает 2000 м<sup>3</sup>. Модальное значение находится в интервале от 1500 до 2000 м<sup>3</sup>. Отмечен интервал 3000–3500 м<sup>3</sup>. В единичных случаях выявлены очень высокие запасы древесины (5500 м<sup>3</sup>). Диаграммы распределения общего запаса древесины (рис. 2, Г) и площади хвойных лесов (рис. 2, Б) в лесничествах указывают на низкие значения их запаса. Максимум достигает значений 2000–2200 м<sup>3</sup>. Запас древесины лиственных лесов (рис. 2, Е), как и в случае с площадями, полимодален. Выделяется модальный интервал с очень низким запасом древесины (200–400 м<sup>3</sup>), редки случаи среднего запаса древесины в лесничествах (2000 до 3600 м<sup>3</sup>).

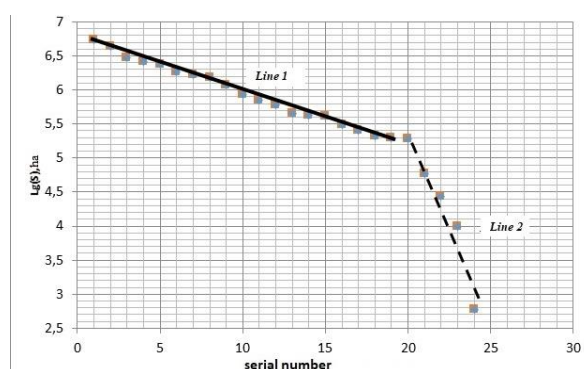
Следует отметить, что площадные размеры лесничеств неоднородны. Самыми крупными по площади являются Каргасокское (5630065 га) и Верхнекетское (4305201 га) лесничества. На два порядка меньше площади Кривошеинского (58100 га) и Томского лесничеств (27500 га), на три порядка – Тимирязевского (9900 га), на четыре – Шегарского лесничества (600 га). Медианное значение площади участков лесничеств в Томской области равно 140529 га.

При интерпретации полученной закономерности изменения площадей лесничеств ожидаема линейная зависимость их роста с ростом номеров в упорядоченной по площади последовательности. Согласно МАУР, при изменении единицы масштаба, зависимость изменения площадей следует степенному закону. Для упрощения визуализации степенные кривые можно линеаризовать с использованием логарифмов. Для ответа на вопрос «Какие площадные размеры наиболее и наименее распространены?» построен график зависимости площади лесничества от порядкового номера в упорядоченной последовательности по ее размеру (рис. 3).



**Рис. 2.** Распределение частоты встречаемости различных показателей в лесничестве: А) суммарная площадь лесов (га); Б) площадь хвойных лесов (га); В) площадь лиственных лесов (га); Г) общий запас древесины ( $m^3$ ); Д) запас древесины хвойных пород ( $m^3$ ); Е) запас древесины лиственных пород ( $m^3$ )

**Fig. 2.** Distribution of various indicators occurrence frequency in the Tomsk region forestries: A) total forest area (ha); B) coniferous forest area (ha); C) deciduous forest area (ha); D) total wood stock ( $m^3$ ); E) coniferous wood stock ( $m^3$ ); F) deciduous wood stock ( $m^3$ )



**Рис. 3.** Зависимость логарифма площади лесничеств от номера в упорядоченной последовательности значений площади лесничеств

**Fig. 3.** Dependence of the logarithm of the area of forest areas on the number in the ordered sequence of values of the area of forest areas

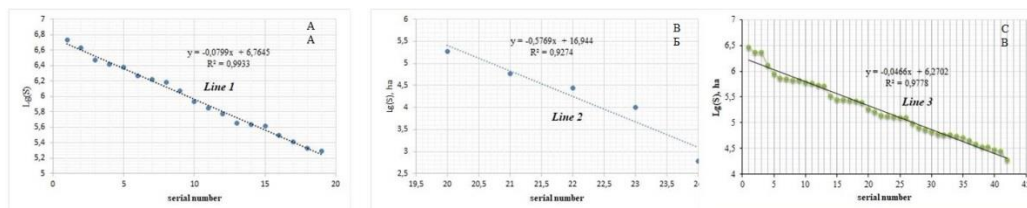
График, представленный на рис. 3, включает два отрезка: Line 1 (17 объектов) и Line 2 (5 объектов), что свидетельствует об их существенном различии и

объективности фактора разделения. На наш взгляд, к отрезку 1 относятся лесничества, образованные в соответствии с нормативными инструкциями (рис. 4, А) при  $R^2=0,99$ . Отрезок 2 графика характеризует лесничества сверхмалого размера (рис. 4, В), к примеру, выделенные вблизи населенных пунктов для удобства контроля территории ( $R^2=0,92$ ). Заметим, что коэффициенты углов наклона отрезков 1 и 2 к оси абсцисс ( $-0,8$  и  $-0,577$ ) различаются в 7,5 раз, т. е. малые лесничества выбиваются из общей схемы территориального деления.

Территории лесничеств разделены на участковые лесничества и являются иерархическими системами, вложенными друг в друга как матрешки (рис. 4, С). Наклон зависимости Line 3 почти в два раза меньше, чем Line 1 (рис. 5, А). Максимальный наклон у Line 2. Линии 1 и 3 пересекаются при значении 310 га ( $lg(S)=5,6$ ) при достижении равенства площадей лесничества и участкового лесничества. После точки пересечения эти различия нивелируются. Как видно из рис. 5, В, С, по углам наклона Line 2 отличен от от-

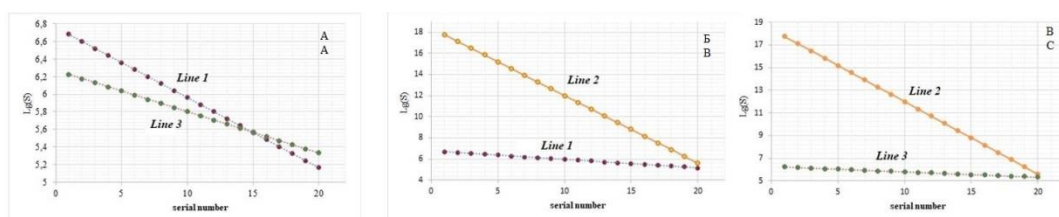
резков 1 и 3; пересечение между Line 2 и линиями 1 и 3 происходит только в крайних точках, что указывает на то, что сверхмалые лесничества (Line 2) находится

в других условиях территориального масштабирования по сравнению с обычными и участковыми лесничествами.



**Рис. 4.** Зависимость логарифма значений площади лесничества от порядкового номера в упорядоченной последовательности по значениям площади: А) лесничества обычной размерности (отрезок 1); В) сверхмалые лесничества (отрезок 2); С) участковые лесничества (отрезок 3)

**Fig. 4.** Dependence of the forest area values logarithm on the ordinal number in the ordered sequence of the values of the area: A) forest areas of normal size by area (segment 1); B) ultra-small forest areas (segment 2); C) district forest areas (segment 3)



**Рис. 5.** Сопоставление наклонов зависимостей значений площади лесничества от номера лесничества в упорядоченной последовательности по значениям площади попарно: отрезки 1 и 3 (А); отрезки 1 и 2 (В); отрезки 2 и 3 (С). Условные обозначения – см. рис. 4.

**Fig. 5.** Comparison of the slopes of the dependencies of the forest area values on the number of the forest area in an ordered sequence by the values of the area in pairs: segments 1 and 3 (A); segments 1 and 2 (B); segments 2 and 3 (C). Symbols – see Fig. 4.

Таким образом, с одной стороны наблюдается наложение объектов разных иерархических уровней организации пространственной структуры лесничеств; с другой стороны, имеется много лесничеств (площадью менее 310 га), выделенных в противоречии с общим естественным подходом к разделу земель лесного фонда. Столь явное нарушение иерархии пространственного деления при образовании малых лесничеств как территориальных единиц управления в области использования лесов объяснимо высокой стоимостью древесины и необходимостью контроля охраны, защиты и воспроизводства лесов вблизи населенных пунктов.

Для детализации принципов иерархического деления земель Лесного фонда на лесничества использован иерархический кластерный анализ. Результаты иерархического анализа структуры естественной агрегации лесничеств по площади представлены на рис. 6.

Группа мелкокоразмерных лесничеств делится на две подгруппы: первая характеризуется интервалом площадей 260–286 тыс. га, а вторая – 19–185 тыс. га; вторая подгруппа включает две агрегации: 125–185 и 51–19 тыс. га. Агрегации формируют достаточно однородные по площадям лесничества.

В зависимости от уровня разделения в кластерном анализе выделяются девять иерархических уровней площадных размеров лесничеств (табл. 2), а уровень их раздела пропорционален масштабу – чем меньше, тем крупнее масштаб исследования.

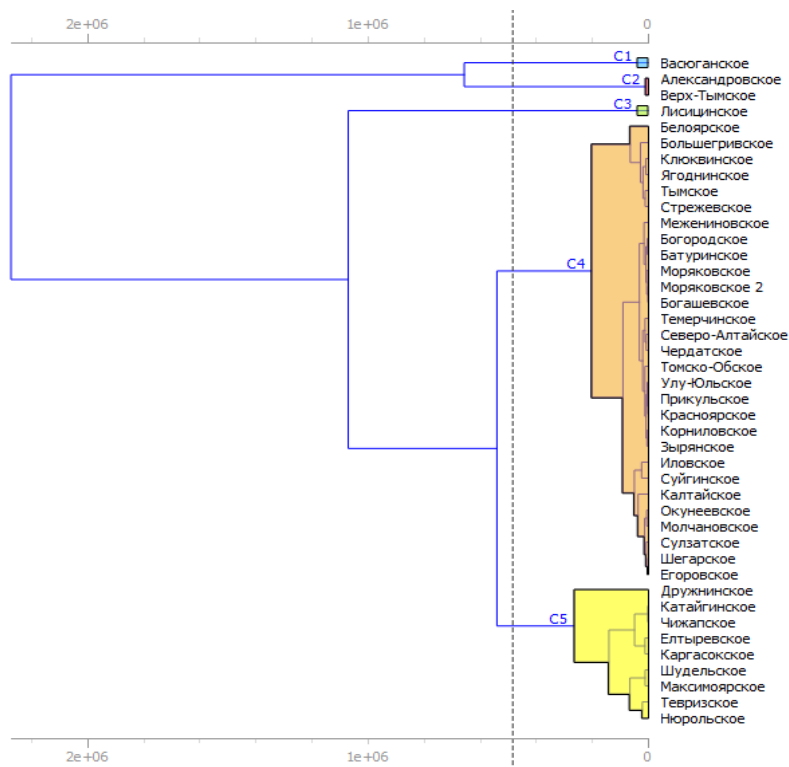
Очевидно, что информация о состоянии лесов кластеров С1–С3 и кластеров С4, С5 (средне- и мелкокораз-

мерных лесничеств) должна существенно различаться. Следовательно, неправомерно проводить оценку лесоустроительных характеристик крупно- и мелкокоразмерных кластеров едиными методами, что доказывает необходимость использования принципов MAUP при статистическом анализе характеристик лесных выделов для эффективного управления лесами.

**Таблица 2.** Уровень иерархии, количество кластеров и условия кластеризации: значение Евклидова расстояния (\* $e10^6$ ) площадей (га) лесничеств и шкала соотношений масштабов (%)

**Table 2.** Hierarchy level, number of clusters and clustering conditions: value of Euclidean distance (\* $e10^6$ ) of areas (ha) of local forestry and height ratio (%)

Параметр Parameter	Значение/Value								
Уровень иерархии Hierarchy level	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество кластеров Number of clusters	2	3	5	7	9	11	13	16	22
Евклидово расстояние (* $e10^6$ ) Euclidean distance (* $e10^6$ )	1,2	0,8	0,5	0,18	0,04	0,03	0,02	0,01	0,008
Шкала соотношений, % Height ratio, %	52,9	35,1	19,6	7,1	3,1	2,5	1,9	1,0	0,5



**Рис. 6.** Иерархический анализ структуры агрегации лесничеств по площади  
**Fig. 6.** Hierarchical analysis of the structure of local forestry area aggregation

#### Заключение

В ходе исследования проверена гипотеза о том, что распределение площадей лесного фонда по лесничествам не случайно, а обусловлено социально-экономическими факторами. Диапазон изменчивости площадей участковых лесничеств Томской области составляет 282–2332087 га. Ряд лесничеств расположены в одном административном районе, другие – сразу в нескольких; имеются лесничества с высокой и низкой степенью фрагментации территорий. Критическое значение средней площади участка (71255 га) выявлено по профилю желательности с вероятностью 63 %. Генеральное среднее значение суммарной площади лесов составляет 175000 га, площади хвойных древостоев по лесничествам – 6000 га, а лиственных – 11000 га. Площадь хвойных лесов по лесничествам в основном не превышает 8000 га, лиственных сосредоточена в интервалах 4000–10000 га и 16000–20000 га. Распределение суммарной площади лиственных и хвойных лесов, а также запасов древесины по лесничествам отличается от нормального, что доказывает неслучайность разбиения территории.

Суммарная площадь земель лесного фонда по лесничествам распределена не равномерно и близка к логнормальной модели. Максимум площадей лесничеств сосредоточен в интервале до 15 тыс. га, очень редки крупные участки более 30 тыс. га. Высока фрагментарность хвойных лесов – модальный размер участка составляет от двух до четырех тысяч гектаров; крупные массивы редки. Распределение площадей лиственных лесов полимодально и разделено на три части: до 2 тыс. га, 4–120 тыс. га, 14–20 тыс. га.

Суммарный запас древесины сосредоточен в интервале до 2000 м<sup>3</sup>, модальное значение – в интервалах от 1500 до 2000 м<sup>3</sup> и от 3000 до 3500 м<sup>3</sup>. Запас древесины лиственных лесов в лесничествах, как и в случае с площадями, полимодален – выделен модальный интервал с очень низким запасом – 200–400 м<sup>3</sup>; редки случаи среднего запаса – от 2000 до 3600 м<sup>3</sup>.

Логнормальное распределение общей площади лесничеств объяснимо логарифмической зависимостью площади выдела от его порядкового номера при упорядочивании ее по убыванию. Показано, что в соответствии с принципами проблемы изменяющегося масштаба (MAUP) площадные размеры лесничеств изменяются по степенному закону. Выявлено, что выделяются две группы объектов: обычные (17) и сверхмалые (5). Наклон линии зависимости сверхмалых наибольший. На порядок меньше наклон зависимости обычных размеров лесничеств. Участковые лесничества имеют наклон зависимости в 2 раза меньший, чем обычные лесничества. Следовательно, при переходе от одного иерархического уровня размеров лесничеств к другому масштаб исследования увеличивается кратно.

Установлено, что по размерам лесничества пересекаются с нижележащим иерархическим уровнем – участковыми лесничествами в точке 310 га. Меньше этого размера лесничества и участковые лесничества не различаются.

Иерархический анализ структуры естественной агрегации лесничеств по площади показал наличие пяти уровней и, соответственно, пяти групп кластеров. В зависимости от уровня разделения в кластерном

анализе выделяются девять иерархических уровней площадных размеров лесничеств, а уровень их раздела пропорционален масштабу – чем меньше, тем крупнее масштаб исследования – в полном соответствии с подходом МАУР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении основ государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года. Распоряжение Правительств Российской Федерации от 26 сентября 2013 года N 1724-р. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499047151> (дата обращения 02.10.2020).
2. Добрынин Д. Перспективы ведения лесного хозяйства с сохранением постоянного лесного покрова в Финляндии и в России // Устойчивое лесопользование. – 2019. – № 1 (57). – С. 42–45.
3. Kovyazin V.F., Romanchikov A.Yu., Pasko O.A. Comparative analysis of forest landscadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012039
4. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services / E.G. Brockerhoff, L. Barbaro, B. Castagnyrol, D.I. Forrester, B. Gardiner, J.R. González-Olabarria, Ph.O'V. Lyver, N. Meurisse, A. Oxbrough, H. Taki, I.D. Thompson // Biodiversity and Conservation. – 2017. – V. 26. – P. 3005–3035.
5. Петкау В.В. Гибкое и превентивное лесопользование в России // Вестник Челябинского государственного университета. Экономика. – 2009. – Вып. 1. – № 19 (157). – С. 127–132.
6. Добрынин Д. О проблеме выявления лесных участков, на которых возможно экономически выгодное интенсивное и экологически устойчивое лесопользование // Устойчивое лесопользование. – 2012. – № 2 (31). – С. 12–23.
7. Моисеев Н.А. Лесная экономика как отраслевая наука и ее прикладное значение в условиях реформ лесоуправления // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2008. – № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lesnaya-ekonomika-kak-otraslevaya-nauka-i-ee-prikladnoe-znachenie-v-usloviyah-reform-lesoupravleniya> (дата обращения: 02.10.2020).
8. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 31.07.2020). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299) (дата обращения: 02.10.2020).
9. Об утверждении Лесоустроительной инструкции (с изменениями на 6 февраля 2020 года: Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 марта 2018 года N 122. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542621790> (дата обращения: 02.10.2020).
10. Об утверждении нормативов площади участков лесничеств, лесных кварталов: Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 26 октября 2011 года N 447. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902321627> (дата обращения: 02.10.2020).
11. Taxation indices of forest stand as the basis for cadastral valuation of forestlands / V.F. Kovyazin, V.N. Belyaev, O.A. Pasko, A.Yu. Romanchikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – V. 21. – DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012026
12. Оценка состояния припоселковых кедровников Томской области с использованием данных дистанционного зондирования Земли / О.А. Пасько, О.С. Токарева, А.Д.А. Алшаиби, Т.Ю. Черникова, П. Кабраль // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 98–109.
13. Мониторинг состояния растительного покрова территории Центрального Ирака с использованием спутниковых данных Landsat-8 // О.С. Токарева, О.А. Пасько, С.М. Маджид, П. Кабраль // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 19–31.
14. Shawna J.D., Bram D. The modifiable areal unit problem (MAUP) in physical geography // Progress in Physical Geography. – 2018. – V. 31 (5). – P. 471–479. DOI: 10.1177/0309133307083294.

Очевидно, что информация о состоянии лесов кластеров разных уровней иерархии должна существенно различаться по содержанию и проведению оценки лесоустроительных характеристик крупно- и мелкомерных кластеров и без учета МАУР некорректна для принятия эффективных управленческих решений.

15. Applied Research Projects. URL: <https://www.espon.eu/applied-research> (дата обращения: 02.10.2020).
16. Lee G.I., Cho W.K., Kim K.K. The problem of variable area units in hedonistic models of housing prices // Urban Geography Phys. – 2016. – V. 37 (2). – P. 223–245. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5466483> (дата обращения: 02.10.2020).
17. A global map of travel time to cities to assess inequality in accessibility in 2015 / D.D. Vas, A. Nelson, H.S. Gibson, V. Temperley, A. Lieber // Nature. – 2018. – V. 553 (7688). – P. 333–336. DOI: 10.1038/nature25181.
18. Global distribution data for cattle, buffaloes, horses, sheep, goats, pigs, chickens and ducks in 2010 / M. Gilbert, G. Nicolas, G. Cinardi, T.P. van Boeckel, S.O. Vanwambeke, G.R.W.W. Wint // Scientific Data. – 2018. – V. 5 (1). – P. 1–11. DOI: 10.1038/sdata.2018.227.
19. Beckel V. Robinson intensive poultry farming in Thailand // Agricultural industry. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.019> (дата обращения: 02.10.2020).
20. Geographic and statistic stability of deprivation aggregated measures at different spatial units in health research / A. Cebrecos, M.F. Dominguez-Berjon, I. Duque, M. Franco // Applied geography. – 2018. – V. 95. – P. 9–18. URL: <https://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/161686.pdf> (дата обращения: 02.10.2020).
21. Truong P.N., Stein A. Hierarchically adaptable spatial regression model for the Association of aggregated health status data and environmental data // Spatial statistics. – 2018. – V. 23. – P. 36–51. URL: <https://research.utwente.nl/en/publications/a-hierarchically-adaptable-spatial-regression-model-to-link-aggre> (дата обращения: 02.10.2020).
22. A spatial regression model for the disaggregation of areal unit based data to high-resolution grids with application to vaccination coverage mapping / C. Utazi, J. Thorley, V. Alegana, M. Ferrari, K. Nilsen, S. Takahashi // Statistical Methods in Medical Research. – 2018. URL: <https://doi.org/10.1177/0962280218797362> (дата обращения: 02.10.2020).
23. Geographical and statistical stability aggregated indicators of deprivation in various spatial units of health research / A. Cebrecos, M.F. Dominguez-Berjon, I. Duque, M. Franco, F. Escobar // Applied geography. – 2018. – V. 95. – P. 9–18.
24. Tatem A.J. World Pop, open data for spatial demography // Scientific Data. – 2017. – V. 4. URL: <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.4> (дата обращения: 12.04.2020).
25. Digital trail of tourists in the cities: comparison of big data sources / M.H. Salas-Olmedo, B. Moya-Gomez, J.C. García-Palomares, J. Gutierrez // Tourism management. – 2018. – V. 66. – P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.11.001> (дата обращения: 02.10.2020).
26. Landscape heterogeneity as a surrogate biodiversity in mountain systems: which spatial analytical unit is most appropriate? / P. Garcia-Llamas, L. Calvo, M. de la Cruz, S. Suarez-Seoane // Environmental indicator. – 2018. – V. 85. – P. 285–294. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.026> (дата обращения: 02.10.2020).
27. Wu J., Levin S.A. A patch-based spatial modeling approach: conceptual framework and simulation scheme // Ecological Modelling. – 1997. – V. 101. – P. 325–346.
28. Wang Ya., Di Q. Modifiable areal unit problem and environmental factors of COVID-19 outbreak // Sci Total Environ. – 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139984. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32534259/> (дата обращения: 02.10.2020).
29. Nelson J.K., Brewer C.A. Evaluating data stability in aggregation structures across spatial scales: revisiting the modifiable areal unit problem // Cartography and Geographic Information Science. – 2017. – V. 44 (1). – P. 35–50. URL: <https://doi.org/10.1080/15230406.2015.1093431> (дата обращения: 02.10.2020).

30. Захарченко А.В., Алексеев В.И., Ипатова Д.В. Иерархическая концепция неоднородности почв и планирование масштаба исследования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 149–163.
31. Алексеев В.И. Вейвлет-анализ динамики изменений явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья и его прогнозирование // Вестник Югорского Государственного Университета. – 2018. – Вып. 3 (50). – С. 75–87. DOI: 10.17816/byusu2018075-87
32. Пасько О.А., Захарченко А.В., Поспелова Е.В. Дифференциация сельскохозяйственных угодий по площадям на примере Томского района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 100–112.
33. Ковязин В.Ф., Мартынов А.Н., Беляева Н.В. Основы лесного хозяйства и таксация леса. – М.; СПб.; Краснодар: Лань, 2017. – 238 с.
34. Департамент лесного хозяйства Томской области. URL: <https://deples.tomsk.gov.ru> (дата обращения: 02.10.2020).
35. Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas // Geoderma. – 2005. – V. 124. – P. 73–89.
36. Pasko O.A., Kovyazin V.F., Zakharchenko A.V., Lebedeva N.A. Spatial organization of forestfund // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/574/1/012061>

Поступила 13.01.2021 г.

#### Информация об авторах

**Пасько О.А.**, доктор сельскохозяйственных наук, кандидат биологических наук, заведующая сектором экспериментальных агротехнологий Агротехнического научно-исследовательского института.

**Захарченко А.В.**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем освоения Севера Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук.

**Ковязин В.Ф.**, доктор биологических наук, профессор кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.



UDC 630.61

## ANALYSIS OF LAND MANAGEMENT OF THE FOREST FUND

**Olga A. Pasko**<sup>1</sup>,  
pasko@agrophys.ru

**Alexander V. Zakharchenko**<sup>2</sup>,  
zakh.al.vic@yandex.ru

**Vasily F. Kovyazin**<sup>3</sup>,  
vfkedr@mail.ru

<sup>1</sup> Agrophysical Research Institute,  
14, Grazhdansky avenue, St. Petersburg, Russia.

<sup>2</sup> Tyumen scientific center of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences,  
86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russia.

<sup>3</sup> Saint Petersburg mining University,  
2, line 21, Vasilievsky island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

**The relevance** of the research is related to the priority attention of the state to the use of forests as the main reproducible natural resource in Russia.

**The aim** of the research is to analyze the existing spatial division of forest lands.

**Objects:** lands of the forest fund of the Tomsk region, divided into districts, forest areas and district forest areas on the principle of three-level hierarchical division

**Methods:** abstract-logical, analytical and mathematical modeling. The working hypothesis assumes that the area of forest plots depends on the value of the scale unit according to the power law, and the coefficient at the logarithm of the function reflects the range of changes in the scale dimension. For the first time, the problem of changing scale is used in relation to the analysis of land management in forest areas.

**Results.** The hierarchical structure of the territorial division of forest lands is revealed. In general, the area of local forest areas in the Tomsk region varies between 282–2332087 ha. Univariate variance analysis of areas shows a low probability of a null hypothesis (less than 1 %). The desirability profile constructed at the next stage of the study revealed a critical value of the average area equal to 71255 ha, to which the plots correspond with a 63 % probability. The patterns of distribution of the total forest area by forest areas differ from the normal one. Its general average value is 175000 ha, the area of coniferous forests in forest areas – 6000 ha, deciduous forests – 11,000 ha. In general, the area of coniferous forests in forest areas does not exceed 8000 ha, deciduous forests are concentrated in the range of 4000–10000 and 16000–20000 ha. The distribution of wood stock is also heterogeneous. The total area of forests in forest areas is not evenly distributed, and its distribution is close to the lognormal model. The largest number of forest areas is concentrated in the range of up to 15000 ha. Very rarely there are large plots (more than 30000 ha). Fragmentation of coniferous forests is high. The modal size of the site is from two to four thousand hectares. Large areas of forest are quite rare. The distribution of deciduous forest areas is polymodal and is divided into three parts: up to 2000 ha, 4000–120000 ha, 14000–20000 ha, which indicates the presence of small and medium-sized forests, as well as large woodlands. One forest area is very large (more than 32000 ha). The total supply of liquid wood is concentrated in the range from 0 to 2000 m<sup>3</sup>. The modal value is within the range from 1500 to 2000 m<sup>3</sup>. The interval of 3000–3500 m<sup>3</sup> is marked. In some cases, very high reserves of wood were found (5500 m<sup>3</sup>). The stock of liquid deciduous wood, as in the case of areas, is polymodal. There is a modal interval with a very low wood stock of the order of 200–400 m<sup>3</sup>. There are rare cases of an average stock from 2000 to 3600 m<sup>3</sup>. The logarithmic dependence of the forest area on the ordinal number of the allotment in the sequence of forest areas ordered in descending order of area is established. The logarithm coefficient depends on the group of forest areas (very large, large, medium, small). A similar pattern is shown for local forest districts. There is a clear violation of the hierarchy of spatial division in the allocation of small forest areas, explained by the economic reason. Hierarchical analysis of the structure of natural aggregation of forest areas by area showed the presence of five nested levels of heterogeneity and, accordingly, five groups of clusters. Depending on the level of division, the cluster analysis identifies nine hierarchical levels of area sizes of forest areas, and the level of their division is proportional to the scale – the smaller, the larger the scale of the study. This should be reflected in information about the state of forest areas in clusters C1–C3 (very large and large) and C4, C5 (medium and small) to develop effective management decisions.

**Key word:**

Forest fund, MAUP, forestry, area, hierarchical division.

## REFERENCES

1. *Ob utverzhenii osnov gosudarstvennoy politiki v oblasti ispolzovaniya, okhrany, zashchiti i vosproizvodstva lesov v Rossiiskoy Federatsii na period do 2030 goda. Rasporyazhenie pravitelstva Rossiiskoy Federatsii ot 26 sentyabrya 2013 goda no. 1724\_r* [On approval of bases of the state policy in the field of use, protection and reproduction of forests in the Russian Federation for the period till 2030. The order of the government of the Russian Federation on 26 September, 2013 no. 1724-p]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/499047151> (accessed 2 October 2020).
2. Dobrinin D. Perspektivy vedeniya lesnogo khozyaistva s sokhraneniem postoyannogo lesnogo pokrova v Finlyandii i v Rossii [Prospects of forest management with the preservation of permanent forest cover in Finland and Russia]. *Ustoychivoe lesopolzovanie*, 2019, no. 1 (57), pp. 42–45.
3. Kovyazin V.F., Romanchikov A.Yu., Pasko O.A. Comparative analysis of forest landscadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012039

4. Brockerhoff E.G., Barbaro L., Castagneyrol B., Forrester D.I., Gardiner B., González-Olabarria J.R., Lyver P.O'B., Meurisse N., Oxbridge A., Taki H., Thompson I.D. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 2017, vol. 26, pp. 3005–3035.
5. Petkau V.V. Flexible and preventive forest management in Russia. *Bulletin of the Chelyabinsk state University. Economy*, 2009, vol. 1, no. 19 (157), pp. 127–136. In Rus.
6. Dobrinin D. O probleme vyavleniya lesnykh uchastkov, na korykh vozmozhno ekonomicheski vygodnoe intensivnoe i ekologicheskii ustoychivoe lesopolzovanie [On the problem of identifying forest areas that can be economically profitable intensive and environmentally sustainable forest management]. *Ustoychivoe lesopolzovanie*, 2012, no. 2, pp. 12–23.
7. Moiseev N.A. Forest economy as a branch science and its applied significance in the context of forest management reforms. *Bulletin of the Moscow state University of forest. Lesnoy Vestnik*, 2008, no. 5. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/lesnaya-ekonomika-kak-otraslevaya-nauka-i-ee-prikladnoe-znachenie-v-usloviyah-reform-lesoupravleniya> (accessed 2 October 2020).
8. *Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 04.12.2006 no. 200-FZ\_red. ot 31.07.2020* [Forest code of the Russian Federation on 04.12.2006 no. 200-FZ (ed. from 31.07.2020)]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299) (accessed 02 October 2020).
9. *Ob utverzhdenii Lesoustroitelnoy instruksii (s izmeneniyami na 6 fevralya 2020 goda): Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 29 marta 2018 goda no. 122* [On approval of the Forest Management instruction (as amended on February 6, 2020). Order of the Ministry of natural resources and ecology of the Russian Federation of March 29, 2018 no. 122]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/542621790> (accessed 02.10.2020).
10. *Ob utverzhdenii normativov ploshchadi uchastkovykh lesnichestv, lesnykh kvartalov. Prikaz Federalnogo agentstva lesnogo khozaystva ot 26 oktyabrya 2011 goda no. 447* [Approval of standards for the area of precinct forest areas and forest blocks. Order of the Federal forestry Agency of October 26, 2011 no. 447]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902321627> (accessed 2 October 2020).
11. Kovyazin V.F., Belyaev V.N., Pasko O.A., Romanchikov A.Yu. Taxation indices of forest stand as the basis for cadastral valuation of forestlands. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012026
12. Pasko O.A., Tokareva O.S., Alshaibi A.J.A., Chernikova T.Y., Cabral P. Assessment of state of cedar forests in Tomsk region using remote sensing data of the Earth. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 98–109. In Rus.
13. Tokareva O.S., Pasko O.A., Majid S.M., Cabral P. Monitoring vegetation state in the central Iraq using Landsat-8 satellite data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 6, pp. 19–31. In Rus.
14. Shawna J.D., Bram D. The modifiable areal unit problem (MAUP) in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 2018, vol. 31 (5), pp. 471–479. DOI: 10.1177/0309133307083294
15. *Applied Research Projects*. Available at: <https://www.espon.eu/applied-research> (accessed 2 October 2020).
16. Lee J.I., Cho W.K. The problem of variable area units in hedonistic models of housing prices. *Urban Geography Phys.*, 2016, vol. 37 (2), pp. 223–245. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5466483> (accessed 2 October 2020).
17. Vas D.D., Nelson A., Gibson H.S., Temperley V., Lieber A. Global map of travel time to cities to assess inequality in accessibility in 2015. *Nature*, 2018, vol. 553 (7688), pp. 333–336. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature25181> (accessed 2 October 2020).
18. Gilbert M., Nicolas G., Cinardi G., Van Boeckel T.P., Vanwambeke S.O., Wint G.R.W.W. Global distribution data for cattle, buffaloes, horses, sheep, goats, pigs, chickens and ducks in 2010. *Scientific Data*, 2018, vol. 5 (1), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.227> (accessed 2 October 2020).
19. Beckel V. Robinson intensive poultry farming in Thailand. *Agricultural industry*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.019> (accessed 2 October 2020).
20. Cebrecos A., Dominguez-Berjon M.F., Duque I., Franco M., Aggregated indicators of deprivation in various spatial units of health research. *Applied geography*, 2018, vol. 95, pp. 9–18. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.001> (accessed 2 October 2020).
21. Truong P.N., Stein A. Hierarchically adaptable spatial regression model for the Association of aggregated health status data and environmental data. *Spatial statistics*, 2018, vol. 23, pp. 36–51. Available at: <https://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/161686.pdf> (accessed 2 October 2020).
22. Utazi C., Thorley J., Alegana V., Ferrari M., Nilsen K., Takahashi S. A spatial regression model for the disaggregation of areal unit based data to high-resolution grids with application to vaccination coverage mapping. *Statistical Methods in Medical Research*, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1177/0962280218797362> (accessed 2 October 2020).
23. Cebrecos A., Dominguez-Berjon M.F., Duque I., Franco M., Escobar F. Geographical and statistical stability aggregated indicators of deprivation in various spatial units of health research. *Applied geography*, 2018, vol. 95, pp. 9–18.
24. Tatem A.J. World Pop, open data for spatial demography. *Scientific Data*, 2017, vol. 4. Available at: <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.4> (accessed 12 April 2020).
25. Salas-Olmedo M.H., Moya-Gomez B., García-Palomares J.C., Gutierrez J. Digital trail of tourists in the cities: comparison of big data sources. *Tourism management*, 2018, vol. 66, pp. 13–25. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.11.001> (accessed 2 October 2020).
26. Garcia-Llamas P., Calvo L., De la Cruz M., Suarez-Seoane S. Landscape heterogeneity as a surrogate biodiversity in mountain systems: which spatial analytical unit is most appropriate? *Environmental indicator*, 2018, vol. 85, pp. 285–294. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.026> (accessed 2 October 2020).
27. Wu J., Levin S.A. A patch-based spatial modeling approach: conceptual framework and simulation scheme. *Ecological Modelling*, 1997, vol. 101, pp. 325–346.
28. Wang Ya., Di Q. Modifiable areal unit problem and environmental factors of COVID-19 outbreak Affiliations expand PMID. *Total Environ*, 2020. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32534259> (access 2 October 2020).
29. Nelson J.K., Brewer C.A. Evaluating data stability in aggregation structures across spatial scales: revisiting the modifiable areal unit problem. *Cartography and Geographic Information Science*, 2017, vol. 44 (1), pp. 35–50. Available at: <https://doi.org/10.1080/15230406.2015.1093431> (accessed 2 October 2020).
30. Zakharchenko A.V., Alekseev V.I., Ipatova D.V. Hierarchical concept of soil heterogeneity and planning the scale of research. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 149–163. In Rus.
31. Alekseev V.I. Wavelet analysis of the dynamics of changes in the El niño-La niña phenomenon and its prediction. *Bulletin of Ugra State University*, 2018, vol. 3 (50), pp. 75–87. In Rus. DOI: 10.17816/byusu2018075-87
32. Pasko O.A., Zakharchenko A.V., Pospelova E.V. Area differentiation of agricultural land on the example of Tomsk district. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 100–112. In Rus.
33. Kovyazin V.F., Martynov A.N., Belyaeva N.V. *Osnovy lesnogo khozaystva i taksatsiya lesa* [Fundamentals of forestry and forest taxation]. Moscow, St-Petersburg, Krasnodar, Lan Publ., 2017. 238 p.
34. *Sayt Departamenta lesnogo khozaystva Tomskoy oblasti* [Website of the Department of forestry of the Tomsk region]. Available at: <https://deples.tomsk.gov.ru> (access 2 October 2020).
35. Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*, 2005, vol. 124, pp. 73–89.
36. Pasko O.A., Kovyazin V.F., Zakharchenko A.V., Lebedeva N.A. Spatial organization of forestfund. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/574/1/012061>

Received: 13 January 2021.

**Information about the authors**

***Olga A. Pasko***, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, head of the Sector of Experimental Agricultural Technologies, Agrophysical Research Institute.

***Alexander V. Zakharchenko***, Dr. Sc., leading researcher, Tyumen scientific center of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences.

***Vasily F. Kovyazin***, Dr. Sc., professor, Saint Petersburg mining University.

УДК 621.1

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГАБАРИТОВ КАМЕРЫ РЕАКТОРА ПО ПЛАВЛЕНИЮ БАЗАЛЬТА

Чаймелов Андрей Александрович<sup>1</sup>,  
chaymelovaa@ya.ru

Строгонов Константин Владимирович<sup>1</sup>,  
strogonovkv@yandex.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14.

*Для развития новейших технологий энергосбережения необходимо применять эффективные и доступные теплоизоляционные материалы. Уже долгое время, а самое главное, с большим успехом, за рубежом применяют материалы, изготовленные из расплавов горных пород – базальтов. Базальт – самое приемлемое сырье для получения экологически чистых и, самое главное, недорогих изделий. В России наблюдается все более возрастающий интерес к изделиям на основе базальтового волокна, обусловленный бурным развитием строительства. На данный момент на территории России открыто более 300 месторождений горных пород базальтового состава. А в стратегии социально-экономического развития Северо-Кавказского Федерального округа до 2025 г. производство стройматериалов из базальта обозначено как приоритетная отрасль. Но существует и ряд проблем, которые сдерживают развитие производственных мощностей по переработке магматических пород в непрерывное базальтовое волокно, такие как поддержание постоянства температурного и химического состава расплава. Актуальной является и задача снижения энергетических затрат на плавление. В данной статье приводятся преимущества базальтового сырья для производства теплоизолирующего материала и анализируются его достоинства по сравнению с другими материалами. Описывается сущность изобретенного одним из авторов статьи реактора по плавлению базальта для изготовления непрерывного базальтового волокна, представлены сравнительные результаты расчётов времени плавления базальта в данном устройстве, а также результаты времени плавления для двух разных типов расплава, приведены результаты расчета габаритов плавильной зоны реактора по плавлению базальта. Представлены результаты проведенного холодного эксперимента по времени плавления, результаты пересчета на существующий реактор.*

### Ключевые слова:

Плавление, базальтовое волокно, реактор, барботаж, энергоэффективность.

### Введение

В данный момент наибольший интерес для развития эффективных и доступных теплоизоляционных материалов представляют волокнистые термостойкие теплозвукоизоляционные материалы на основе магматических горных пород (базальты, диабазы габбро и др.). Главными преимуществами материалов, выполненных с применением базальтового волокна, являются доступность и низкая стоимость сырья, высокая термостойкость, низкая теплопроводность, высокая химическая устойчивость к агрессивным средам, хорошие звукоизоляционные показатели, а самое главное, экологическая безопасность как производства, так и последующей эксплуатации готового материала [1–3]. Чтобы получить такие материалы, необходимо расплавить горную породу (базальт) и далее при помощи специальных устройств (фильер) получить базальтовое волокно.

Благодаря своим уникальным свойствам базальтовое волокно и продукция на его основе все чаще находят большое применение во всех отраслях промышленности. Изделия из базальтового волокна могут выдерживать температуры до 700 °С, они устойчивы к различным кислотам и щелочам, а также обладают значительной механической прочностью, они не дымят и не горят, не набирают влагу, но при этом они значительно дешевле, чем материалы на углеродном волокне [4].

Применяются материалы из базальта почти везде: в нефтегазовой и нефтехимической отрасли, строительстве, автомобильной и пищевой промышленно-

сти, в производстве радиоэлектроники, машиностроении, авиа- и судостроении, в транспортных перевозках, а также в атомной промышленности.

В данной работе ставится задача по разработке методики расчета на основе физического эксперимента и теоретических исследований с их согласованием. Для этого были проведены расчёты и ряд холодных экспериментов, которые позволили рассчитать габариты плавильной зоны в зависимости от скорости движения расплава.

### Разработанное техническое решение и описание метода исследования

Наиболее энергоёмким и затратным процессом в производстве базальтового волокна является процесс плавления базальта. Известны работы авторов О.Г. Волокитина и Г.Г. Волокитина, в которых рассматриваются вопросы высокотемпературного и интенсивного плавления силикатов, а также приводятся результаты физических экспериментов по получению расплава в плазмотроне [5, 6]. В настоящее время по различным источникам информации в самых современных печах по производству непрерывного базальтового волокна для плавления 1 т расплава используется более 130 м<sup>3</sup> природного газа [7]. На промышленных печах одного из производств затрачивается 54915,38 кДж на расплав 1 т [8]. В табл. 1 представлены данные одного из существующих агрегатов на территории Российской Федерации по производству непрерывного базальтового волокна [9].

**Таблица 1.** Характеристики существующего агрегата по плавлению базальта с целью получения непрерывных базальтовых нитей

**Table 1.** Characteristics of an existing basalt melting unit for production of continuous basalt filaments

Характеристика Characteristic	Значение Value	Единица измерения Unit
Производительность Productivity	2300	кг/ч kg/h
Температура расплава Melt temperature	1450–1500	°C
Удельный съем расплава с единицы поверхности пода Specific removal of the melt from a unit of the hearth surface	7000	кг/(м <sup>2</sup> сутки) kg/(m <sup>2</sup> day)
Топливо/Fuel	природный газ/natural gas	–
Удельный расход газа Specific gas consumption	130	м <sup>3</sup> /т m <sup>3</sup> /t
Габаритные размеры Overall dimensions		
длина/length	16,6	м/м
ширина/width	10,3	
высота/height	6,0	

Известен способ для непрерывного плавления базальта, заключающийся в том, что базальтовую шихту подают в печь, где она плавится за счет теплоты радиационного излучения. Конструкция печи имеет существенный участок подогрева базальтовой шихты, зону плавления шихты, участок расплавленного базальта и требует перегрева расплава для естественной дегазации, а с помощью фильерных установок производят непрерывные базальтовые волокна. Данный способ описан в [11].

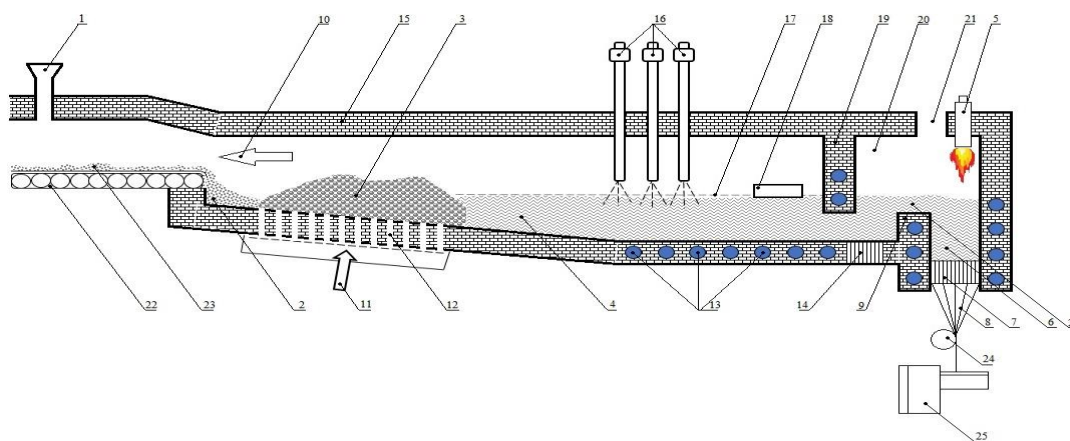
Явным недостатком подобных устройств является большой расход энергии и отсутствие технической возможности удаления примесей (тяжелых и легких фракций) из расплава базальта. В связи с этим актуальными являются вопросы: снижения удельных затрат энергии, повышения производительности печи,

улучшения качества изделия, удешевления производства и уменьшения тепловых потерь.

Для решения обозначенных выше задач на кафедре энергетики высокотемпературной технологии Национального исследовательского университета «МЭИ» разрабатывается конструкция высокопроизводительной печи для производства непрерывного базальтового волокна (НБВ), отличительной особенностью которой является применение барботажа и зона вакуумирования для осветления расплава на участке менее 400 мм. В данном изобретении [10] в начале печи установлен конвейер для подачи шихты, далее под печи выполнен наклонным, перфорированным, с установленным под ним насосом для подачи газа, затем под выполнен горизонтальным, под которым, так же как и в торцевых стенках печи, расположена система охлаждения в виде труб, а в зоне выгрузки установлена перегородка, отделяющая зону вакуумирования с установленным в ней нагнетательным насосом. Главным же преимуществом является применение перфорированного ограждения в поду печи. Перфорация – это под, выполненный с множеством отверстий, через которые поступает газообразное топливо.

Преимущества разрабатываемой печи:

- это наименее энергозатратный вариант погруженного в расплав факела;
- горение и наибольшие температуры в расплаве, а не над ним, это интенсифицирует процесс нагрева и плавления;
- барботаж примерно на порядок увеличивает коэффициент теплоотдачи за счёт интенсивного перемешивания расплава;
- потеря теплоты через ограждение на данном участке фактически отсутствует, поскольку она тратится на подогрев газовой смеси, которая поступает в реактор, тем самым осуществляется возврат энергии обратно в процесс.



**Рис. 1.** Схема разрабатываемой печи: 1 – фидерная печь; 2 – бункер с дозатором и загрузчиком базальта; 3 – теплообменник; 4 – свод; 5 – горелки; 6 – фильерные питатели; 7 – замасливатель; 8 – бобина; 9 – конвейер; 10 – под печи; 11 – перфорация; 12 – насос; 13 – перегородка; 14 – зона вакуумирования; 15 – нагнетательный насос; 16 – система охлаждения в виде труб; 17 – горизонтальная часть пода; 18 – торцевые стенки; 19 – отверстие

**Fig. 1.** Diagram of the furnace being developed: 1 – feeder furnace; 2 – hopper with a dispenser and basalt loader; 3 – heat exchanger; 4 – arch; 5 – burners; 6 – die feeders; 7 – oiler; 8 – bobbin; 9 – conveyor; 10 – hearth; 11 – perforation; 12 – pump; 13 – partition; 14 – evacuation zone; 15 – discharge pump; 16 – cooling system in the form of pipes; 17 – horizontal part of the hearth; 18 – end walls; 19 – hole

Устройство работает следующим образом: шихту по конвейеру – 9 подают в зону подогрева шихты до температур 250–600 °С и удаляют влагу путем подачи газа через перфорацию – 11, после чего она попадает в зону кипящего слоя. Далее она попадает в зону выравнивания температур, где с помощью теплообменника – 3 выравнивается температура расплава. В зоне происходит дегазация расплава, которая создается в зоне вакуумирования – 14, после чего расплав попадает в зону непрерывной разливки. Устанавливаются два или более щелевых или струйных фильерных питателей – 6, через которые наматывающей машиной – 8 происходит вытяжка и намотка на бобины первичных непрерывных волокон. Количество фильерных питателей, установленных в фидере, может быть увеличено. Для разогрева в момент пуска и в исключительных случаях для поддержания требуемых температур расплава в фидерах на их своде установлены фидерные горелки – 5 (в нормальном, устоявшемся режиме горелки не работают).

Благодаря наличию стенки – 13 предусмотрен пепрежим, позволяющий организовать минимальный слой базальтового расплава для эффективной дегазации расплава в зоне вакуумирования – 14. Здесь же предусмотрено технологическое отверстие – 19 для создания разряженной атмосферы [10].

Ключевым вопросом, характеризующим габариты установки, является время плавления базальта. Расчеты включают проверку методики на моделирующем материале (лед), подтверждение на физическом эксперименте и расчеты по плавлению базальта.

#### Физические эксперименты

Для проверки правильности выбранной методики расчета по определению времени плавления базальта ее результаты целесообразно сопоставить с результатами физических экспериментов.

Физические эксперименты по плавлению базальта не позволяют визуально наблюдать процесс плавления и зафиксировать время, в связи с этим для проверки расчетов в первом приближении в качестве моделируемого материала был выбран лед размером 10 мм, что соответствует размерам базальта, подаваемого на плавление. Лёд имел форму усеченной пирамиды, а в расчетах принимались формулы для шара, однако опыты показали, что существенного влияния на время нагрева и плавления форма материала не оказывает. Расхождение в расчетах объясняется погрешностью визуального определения момента окончательного расплавления особенно для барботируемого расплава. Это объясняется тем, что в первоначальный период нагрева и плавления первыми оплавляются грани и расплавляемый материал фактически принимает форму шара. Поэтому для инженерных расчетов можно предполагать, что и плавление кусков дробленого базальта одинаковых фракций можно рассчитывать по данным формулам. Физические эксперименты со льдом безопасны, наглядны, можно сделать демонстрационную установку из оргстекла. Также при выборе материала важным стало то, что базальт при попадании в расплав начинает трескаться

[11–14], то же самое происходит и со льдом, погруженным в горячую воду.

В ходе физического эксперимента было проведено 10 опытов по наблюдению за плавлением льда в барботируемой ванне. Суть эксперимента заключалась в нагреве и плавлении льда определенного диаметра с целью выяснить, за какое время кусок полностью расплавится. В емкости объемом 3 литра было организовано кипение воды, что моделирует процесс барботажного расплава [15]. В этот сосуд с кипящей водой подавался кусок льда, одновременно начинался подсчет времени плавления. Замеры проводились такими приборами, как: термометр электронный с щупом для измерения температуры воды, секундомер для измерения времени плавления. По итогу данного физического эксперимента были получены следующие результаты (табл. 2).

Также был проведен эксперимент, в котором плавление льда проводили в горячей воде, без кипения. Такой эксперимент моделирует плавление в существующих печах ванного типа без принудительного перемешивания расплава. Суть эксперимента идентична – в горячую воду, но уже не кипящую, опускался кусок льда, и проводилось наблюдение за плавлением. Лед в этом эксперименте трескался, всплывал, но не распадался. Увеличение времени плавления связано со снижением температуры воды. Результаты, полученные для этого эксперимента, также представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты физического эксперимента

Table 2. Results of a physical experiment

№ опыта Experiment no.	Спокойный расплав Calm melt	Барботируемый расплав Boiling melt
	Время плавления льда, с Ice melting time, s	
1	25,90	12,90
2	25,70	13,07
3	26,10	13,01
4	26,10	13,53
5	27,30	11,09
6	29,70	10,47
7	31,00	13,80
8	31,50	10,90
9	33,60	13,60
10	35,40	13,50
Среднее/Average	29,23	12,58

#### Расчёты времени плавления для барботируемого расплава

Расчеты проводились в математической среде Mathcad. Для расчетов были взяты формулы авторов [16–18], которые справедливы для условий теплообмена в печах с кипящим слоем. Величина  $\alpha_{sr}$  при теплообмене твердой частицы с расплавом весьма значительна: 4000–300 Вт/м<sup>2</sup>·К, благодаря чему кипящий слой расплава является средой, способной обеспечить высокую эффективность плавильных процессов [18].

Для начала необходимо было понять, каким телом является моделируемый объект

$$Bi = \frac{\alpha_1 \cdot R}{\lambda} = 0,14,$$

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи, который рассчитывался с помощью критерия «Nu», Вт/м<sup>2</sup>·К ( $\alpha_1=68$ );  $R$  – радиус частицы, м ( $R=0,005$ );  $\lambda$  – теплопроводность льда, Вт/м·К ( $\lambda=2,39$ ) [19].

Так как число  $Bi$  меньше 0,25, тело является термически тонким, следовательно, дальнейший расчет времени плавления проводился для термически тонких тел.

Время нагрева льда в форме шара в барботируемом расплаве [16]:

$$\tau_n = \left[ \ln \left[ \frac{T_v + \alpha_{sr} T_{pl} - (\alpha_{sr}) T_n}{T_v + \alpha_{sr} T_{pl} - (\alpha_{sr}) T_{pl}} \right] \right] \frac{c \rho_q d}{6 \alpha_{sr}};$$

$$\tau_n = 7,83 \text{ с},$$

$T_v$  – температура воды, К ( $T_v=361$ );  $T_{pl}$  – температура плавления частицы (льда), К ( $T_{pl}=273$ );  $T_n$  – начальная температура частицы (льда), К ( $T_n=255$ );  $c$  – теплоемкость частицы (льда), Дж/кг·К ( $c=1943$ ) [19];  $\rho_q$  – плотность частицы (льда), кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_q=919,9$ ) [19];  $d$  – диаметр частицы (льда), м ( $d=0,01$ ).

Время плавления термически тонкого тела для барботируемого расплава:

$$\tau_{пл} = \frac{V_{ш} \rho_q q_{pl}}{F_{ш} \alpha_{ж} (T_{oc} + T_{pl})};$$

$$\tau_{пл} = 4,6 \text{ с},$$

где  $T_{oc}$  – температура расплава (воды), К ( $T_{oc}=361$ );  $T_{pl}$  – температура плавления частицы (льда), К ( $T_{pl}=273$ );  $q_{pl}$  – удельная теплота плавления частицы (льда), Дж/кг ( $q_{pl}=3,3 \cdot 10^5$ ) [20];  $\alpha_{ж}$  – коэффициент теплоотдачи от жидкости к расплавляемому материалу, Вт/м<sup>2</sup>·К ( $\alpha_{ж}=1100$ ) [21];  $\rho_q$  – плотность частицы (льда), кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_q=919,9$ ) [20];  $F_{ш}$  – площадь частицы (льда), м<sup>2</sup> ( $F_{ш}=1,2 \cdot 10^{-3}$ );  $V_{ш}$  – объем частицы (льда), м<sup>3</sup> ( $V_{ш}=4,1 \cdot 10^{-6}$ ).

По результатам расчета полное время плавления частицы в барботируемом расплаве составило  $\tau=12,43$  с.

#### Расчёты времени плавления для ванны расплава без принудительного перемешивания расплава

Расчеты проводились в математической среде Mathcad. Для расчётов были взяты формулы авторов [16–18] которые справедливы для условий теплообмена в печах без принудительного перемешивания расплава.

Расчитываем число  $Bi$ :

$$Bi = \frac{\alpha_1 \cdot R}{\lambda} = 0,14,$$

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи, который рассчитывался с помощью критерия «Nu», Вт/м<sup>2</sup>·К ( $\alpha_1=68$ );  $R$  – радиус частицы (льда), м ( $R=0,005$ );  $\lambda$  – теплопроводность льда, Вт/м·К ( $\lambda=2,39$ ) [19].

Так как число  $Bi$  меньше 0,25, тело является термически тонким, следовательно, дальнейший расчет времени плавления проводился для термически тонких тел.

Время нагрева льда в форме шара в расплаве без принудительного перемешивания расплава [17]:

$$\tau_n = \frac{Q_{ш}}{F_{ш} (q_{пов})};$$

$$\tau_n = 18,5 \text{ с},$$

где  $Q_{ш}$  – теплота аккумуляции шара за время нагрева, Вт ( $Q_{ш}=220$ );  $q_{пов}$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ( $q_{пов}=9,46 \cdot 10^3$ );  $F_{ш}$  – площадь частицы (льда), м<sup>2</sup> ( $F_{ш}=1,2 \cdot 10^{-3}$ ); Время плавления шара [17]:

$$\tau_{пл} = \frac{R \rho_q q_{pl}}{\alpha_{sr} (T_{oc} - T_{pl})};$$

$$\tau_{пл} = 10,94 \text{ с},$$

где  $T_{oc}$  – температура расплава (воды), К ( $T_{oc}=361$ );  $T_{pl}$  – температура плавления частицы (льда), К ( $T_{pl}=273$ );  $q_{pl}$  – удельная теплота плавления частицы (льда), Дж/кг ( $q_{pl}=3,3 \cdot 10^5$ ) [20];  $\alpha_{sr}$  – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К ( $\alpha_{sr}=3,440 \cdot 10^3$ ) [18];  $\rho_q$  – плотность частицы (льда), кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_q=919,9$ ) [19];  $R$  – радиус частицы (льда), м ( $R=0,005$ );

По результатам расчета полное время плавления частицы в спокойном расплаве составило  $\tau=29,44$  с.

После проведенных расчетов и экспериментов доказано, что методика по расчёту времени нагрева и плавления корректна, а организация барботажного режима плавления позволяет плавить материал в два раза быстрее, поэтому данная организация плавления значительно энергоэффективнее.

Сравнивая результаты, полученные в ходе проведения эксперимента, и результаты из расчета, получаем расхождение не более в 3 %. Отсюда можем сделать вывод, что расчетные формулы верны и теперь можно перейти к расчету плавления базальта.

Расхождение результатов для барботажного расплава:

$$R_1 = \frac{12,58 - 12,43}{12,58} \cdot 100 \% = 1,19 \%$$

Расхождение результатов для расплава без принудительного перемешивания расплава:

$$R_2 = \frac{29,44 - 29,23}{29,44} \cdot 100 \% = 0,71 \%$$

#### Расчёты времени плавления базальта для барботируемого расплава

Используя методику расчета для барботажного расплава, расчитываем время плавления базальта и габариты печи.

Расчеты проводились в математической среде Mathcad. Для расчётов были взяты формулы авторов [16–18], которые справедливы для условий теплообмена в печах с кипящим слоем.

Значение  $Bi$  для базальта:

$$Bi = \frac{\alpha_1 \cdot R}{\lambda} = 0,018,$$

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи, который рассчитывался с помощью критерия «Nu», Вт/м<sup>2</sup>·К ( $\alpha_1=6$ );  $R$  – радиус частицы, м ( $R=0,005$ );  $\lambda$  – теплопроводность базальта, Вт/м·К ( $\lambda=1,6$ ) [19].

Так как число  $Bi$  меньше 0,25, тело является термически тонким, следовательно, дальнейший расчет времени плавления проводился для термически тонких тел.

Время нагрева (образования корочки) шара [16]:

$$\tau_n = \left[ \ln \left[ \frac{T_v + \alpha_{sr} T_{pl} - (\alpha_{sr}) T_n}{T_v + \alpha_{sr} T_{pl} - (\alpha_{sr}) T_{pl}} \right] \right] \frac{c \rho_c d}{6 \alpha_{sr}};$$
$$\tau_n = 7,437 \text{ с},$$

где  $(\alpha_{sr}$  – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К ( $(\alpha_{sr}=1,16 \cdot 10^3)$ );  $T_v$  – температура газа, К ( $T_v=1773$ );  $T_{pl}$  – температура плавления, К ( $T_{pl}=1473$ );  $T_n$  – начальная температура частицы, К ( $T_n=293$ );  $c$  – теплоемкость частицы, Дж/кг·К ( $c=1675$ ) [19];  $\rho_c$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_c=2750$ ) [19];  $d$  – диаметр частицы, м ( $d=0,01$ ).

Время плавления частицы в виде шара для барботируемого расплава:

$$\tau_{пл} = \frac{V_{ш} \rho_c q_{пл}}{F_{ш} \alpha_{ж} (T_{oc} + T_{pl})};$$
$$\tau_{пл} = 0,038 \text{ с},$$

где  $T_{oc}$  – температура окружающей среды, К ( $T_{oc}=1723$ );  $T_{pl}$  – температура плавления, К ( $T_{pl}=1473$ );  $q_{пл}$  – теплота плавления частицы, Дж/кг ( $q_{пл}=2482$ ) [22];  $\alpha_{ж}$  – коэффициент теплоотдачи от расплава к расплавляемому материалу, Вт/м<sup>2</sup>·К ( $\alpha_{ж}=1200$ ) [23];  $\rho_c$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_c=2750$ ) [19];  $F_{ш}$  – площадь частицы, м<sup>2</sup> ( $V_{ш}=3,14 \cdot 10^{-4}$ );  $V_{ш}$  – объем частицы, м<sup>3</sup> ( $V_{ш}=5,23 \cdot 10^{-7}$ ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basalt.today. 2020. URL: <https://basalt.today/ru/2020/06/23129/> (дата обращения: 15.08.2020).
2. Shishoo R. Technical textiles – technological and market developments and trends // *Indian Journal of Fibre and Textile Research*. – 1997. – V. 22. – P. 213–221.
3. Hafsa J., Rajesh M. A green material from rock: basalt fiber-a review // *Journal of the Textile Institute*. – 2015. – V. 107. – P. 923–937.
4. John M., Thomas S. Bio fibres and bio composites // *Journal of Carbohydr Polym*. – 2008. – V. 71. – P. 343–364.
5. Волокитин О.Г. Физико-технические процессы получения силикатных расплавов и материалов на их основе в низкотемпературной плазме: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2016. – 198 с.
6. Реализация математической модели теплопереноса в агрегате низкотемпературной плазмы при плавлении силикатных материалов / О.Г. Волокитин, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, В.В. Шеховцов // *Вестник ТГАСУ*. – 2014. – № 5. – С. 114–118.
7. S Osnos. Past, present and future of continuous basalt fiber. – 2011. URL: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/past-present-and-future-continuous-basalt-fibre> (дата обращения: 15.08.2020).
8. Basalt.today. 2018. URL: <https://basalt.today/ru/2018/06/16286/> (дата обращения: 15.08.2020).
9. Новицкий А. В. Технология переработки горных пород. – 2015. URL: <http://novitsky1.narod.ru/bazaltfiber.htm> (дата обращения: 12.07.2020).
10. Устройство изготовления непрерывных базальтовых волокон: пат. Рос. Федерация № 2695188; заявл. 07.06.18; опубл. 22.07.19, Бюл. № 21. – 5 с.
11. Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. Основы производств базальтовых волокон и изделий. – М.: Изд-во «Теплоэнергетик», 2002. – 87 с.
12. Basalt fiber: from earth an ancient material for innovative and modern application. – 2011. URL: <https://www.enea.it/it/seguici/publicazioni/EAI/anno-2011/indice-world-view-3-2011/basalt-fiber-from-earth-an-ancient-material-for-innovative-and-modern-application> (дата обращения: 17.07.2020).
13. Sim J. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures // *International Conference on NordMin Information Day and Brokerage Event*. – 2005. – P. 504–512.
14. Basalt.today. 2017. URL: <https://basalt.today/ru/2017/09/12227/> (дата обращения: 15.08.2020).
15. Григорьев В.А., Зорина В.М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. – М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1988. – 433 с.
16. Попов С.К. Повышение энергетической эффективности циклонной плавильной камеры на основе исследования ее предельной производительности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1985. – 268 с.
17. Строгонов К.В., Кузьмин В.Н. Теплотехническая оптимизация процессов в высокотемпературных теплотехнологических реакторах. – М.: Изд-во МЭИ, 2019. – 55 с.
18. Ключников А.Д., Кузьмин В.Н., Попов С.К. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. – М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1990. – 176 с.
19. Hassan M., Benmokrane B. Physical, mechanical, and durability characteristics of basalt FRP (BFRP) bars preliminary test results // *The Fifth International Conference on Construction Materials*. – Canada, 2015. – P. 68.
20. Теплота плавления. – 2019. URL: <https://foxford.ru/wiki/fizika/udelnaya-teplota-plavleniya/> (дата обращения: 15.09.2019).
21. Григорьев В.А., Зорина В.М. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. – М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1988. – 254 с.

По результатам расчета полное время плавления частицы в барботируемом расплаве составило  $\tau=7,475$  с (время нагрева частицы и время плавления).

Далее, задавшись значениями производительности (100 кг/ч), шириной ванны (0,30 м) и высотой жидкого слоя расплава (0,15 м), была посчитана длина участка, на котором происходит нагрев и плавление базальта, которая составила  $b=0,72$  м.

#### Заключение

В данной статье представлена методика расчета плавления базальта на основе физического эксперимента и дальнейшее исследование с ее помощью. Описана работа и представлены преимущества реактора по плавлению базальта, разработанного одним из авторов статьи на кафедре энергетики высокотемпературной технологии Национального исследовательского университета «МЭИ». Были проведены холодные эксперименты с целью выяснения реальных размеров устройства. Показано, что расчетные и экспериментальные значения по плавлению для барботажного режима отличаются на 1,19 %, а для плавления в ванне без принудительного перемешивания расплава – 0,71 %. Сопоставление расчетных данных с экспериментальными позволяет с достаточной точностью говорить о правильности методики расчета по плавлению базальта. Расчётное время нагрева и плавления куска базальта позволило в свою очередь рассчитать длину ванны печи на участке плавления, что по расчетам составило 0,72 м для производительности 100 кг/час, при этом ширина ванны принята 0,3 м, а высота слоя – 0,15 м.



22. Bolasodun B., Nesbit A., Wikinson A. Effect of curing method on physical properties of araldite // International journal of scientific and Technology research. – 2013. – V. 2. – P. 12–18.
23. Ипполитов В.А. Повышение эффективности процесса плавления зернистых материалов на основе кипящего слоя расплава: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982. – 196 с.

*Поступила: 08.09.2020 г.*

#### **Информация об авторах**

**Чаймелов А.А.**, аспирант кафедры энергетики высокотемпературной технологии Национального исследовательского университета «МЭИ».

**Строгонов К.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики высокотемпературной технологии Национального исследовательского университета «МЭИ».

UDC 621.1

## DETERMINING THE DIMENSIONS OF THE REACTOR CHAMBER FOR BASALT MELTING

Andrey A. Chaymelov<sup>1</sup>,  
chaymelovaa@ya.ru

Konstantin V. Strogonov<sup>1</sup>,  
strogonovkv@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research University «MPEI»,  
14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russia.

To develop the latest energy-saving technologies, it is necessary to use effective and affordable thermal insulation materials. For a long time, and most importantly with great success, materials made from rock melts – basalts – have been used abroad. Basalt is the most acceptable raw material for producing environmentally friendly and most importantly inexpensive products. In Russia, there is an increasing interest in products based on basalt fiber, due to the rapid development of construction. At the moment, more than 300 deposits of basalt rocks have been discovered on the territory of Russia. And in the strategy of socio-economic development of the North Caucasus Federal district until 2025, the production of building materials from basalt is designated as a priority industry. However, there are also a number of problems that hinder the development of production capacities for processing igneous rocks into continuous basalt fiber, such as maintaining a constant temperature.

### Key words:

Melting, basalt fiber, reactor, bubble, energy efficiency.

### REFERENCES

1. *Basalt.today*. 2020. Available at: <https://basalt.today/ru/2020/06/23129/> (accessed 15 August 2020).
2. Shishoo R. Technical textiles – technological and market developments and trends. *Indian Journal of fiber and Textile Research*, 1997, vol. 22, pp. 213–221.
3. Hafsa J., Rajesh M. A green material from rock: basalt fiber-a review. *Journal of the Textile Institute*, 2015, vol. 107, pp. 923–937.
4. John M., Thomas S. Bio fibers and bio composites. *Journal of carbon Polym*, 2008, vol. 71, pp. 343–364.
5. Volokitin O. G. *Fiziko-tehnicheskie protsessy polucheniya silikatnykh rasplavov i materialov na ikh osnove v nizkotermpurnoy plazme*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Physical and technical processes for obtaining silicate melts and materials based on them in low-temperature plasma. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk. 2016. 198 p.
6. Volokitin O.G., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V. Implementation of a mathematical model of heat transfer in a low-temperature plasma aggregate during melting of silicate materials. *Vestnik TGASU*, 2014, vol. 5, pp. 114–118. In Rus.
7. Osnos S. *Past, present and future of continuous basalt fiber*. Available at: <http://www.jecomposites.com/knowledge/international-composites-news/past-present-and-future-continuous-basalt-fibre> (accessed 15 August 2020).
8. *Basalt.today*. 2018. Available at: <https://basalt.today/ru/2018/06/16286/> (accessed 15 August 2020).
9. Novitsky A.V. *Tekhnologiya pererabotki gornykh porod*. 2011 [Technology of rock processing]. Available at: <http://novitsky1.narod.ru/bazaltfiber.htm> (accessed 12 July 2020).
10. Strogonov K.V., Nazarov M.N. *Ustroystvo izgotovleniya nepre-ryvnykh bazaltovykh volokon* [Device for manufacturing continuous basalt fibers]. Patent RF, no. 2695188, 2018.
11. Dzhigiris D.D., Makhova M.F. *Osnovy proizvodstv bazaltovykh volokon i izdeliy* [Fundamentals of production of basalt fibers and products]. Moscow, Teploenergetik Publ., 2002. 87 p.
12. *Basalt fiber: from earth an ancient material for innovative and modern application*. Available at: <https://www.enea.it/it/seguici/publicazioni/EAI/anno-2011/indice-world-view-3-2011/basalt-fiber-from-earth-an-ancient-material-for-innovative-and-modern-application> (accessed: 17 July 2020).
13. Sim J. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *International Conference on NordMin Information Day and Brokerage Event*, 2005, pp. 504–512.
14. *Basalt.today*. 2017. Available at: <https://basalt.today/ru/2017/09/12227/> (accessed 15 August 2020).
15. Grigoriev V.A., Zorina V.M. *Promyshlennaya teploenergetika i teplo-tekhnika* [Industrial heat power engineering and heat engineering]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 433 p.
16. Popov S.K. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti tssiklonnoy plavilnoy kamery na osnove issledovaniya predelnoy proizvoditelnosti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the energy efficiency of a cyclone melting chamber based on the study of its marginal productivity. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 1985. 268 p.
17. Strogonov K.V., Kuzmin V.N. *Teplo-tekhnicheskay optimizatssiya protsessov v vysokotemperaturnykh teplo-tekhnologicheskikh reaktorakh* [Heat engineering optimization of processes in high-temperature heat-technological reactors]. Moscow, MEI Publ., 2019. 55 p.
18. Klyuchnikov A.D., Kuzmin V.N., Popov S.K. *Teploobmen i teplovye rezimy v promyshlennykh pechakh* [Heat transfer and thermal modes in industrial furnaces]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 176 p.
19. Hassan M., Benmokrane B. Physical, mechanical, and durability characteristics of basalt FRP (BFRP) bars preliminary test results. *The Fifth International Conference on Construction Materials*. Canada, 2015. pp. 68.
20. *Teplo-tekhnika* [Heat of melting]. Available at: <https://foxford.ru/wiki/fizika/udelnaya-teplota-plavleniya/> (accessed 15 September 2019).
21. Grigoriev V.A., Zorina V.M. *Teoreticheskie osnovy teplo-tekhniki. Teplo-tekhnicheskiy eksperiment* [Theoretical foundations of heat engineering. Heat engineering experiment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 254 p.
22. Bolasodun B., Nesbit A., Wikinson A. Effect of curing method on physical properties of araldite. *International journal of scientific and Technology research*, 2013, vol. 2, pp. 12–18.
23. Ippolitov V.A. *Povyshenie effektivnosti protssessa plavleniya zernistykh materialov na osnove kipiyashchego sloya rasplava*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the efficiency of the melting granular materials based on a boiling layer of melt. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 1982. 196 p.

Received: 8 September 2020.

### Information about the authors

Andrey A. Chaymelov, graduate student, National Research University «MPEI».

Konstantin V. Strogonov, Cand. Sc., associate professor, National Research University «MPEI».

УДК 622.279.72

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ СКВАЖИН ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТОЧЕЧНОЙ ГИДРОПЕСКОСТРУЙНОЙ ПЕРФОРАЦИИ

Хабибуллин Марат Яхиевич<sup>1</sup>,  
m-hab@mail.ru

Гилаев Гани Гайсинович<sup>2</sup>,  
gggilaev@gmail.com

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Октябрьский, Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54 а.

<sup>2</sup> Кубанский государственный технологический университет, Институт нефти, газа и энергетики, Россия, 350058, г. Краснодар, ул. Старокубанская, 88.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью обеспечивать точечное распространение кислотного раствора при проведении кислотной обработки призабойной зоны эксплуатационной скважины. Используя данный метод, повышается эффективность проведения данного процесса путем более глубокого растворения известняковой породы в призабойной зоне скважины и тем самым полнейшего открытия каналов для поступления пластовой жидкости из пласта в скважину.

**Цель:** разработать и предложить метод точечной гидропескоструйной перфорации при кислотной обработке призабойной зоны эксплуатационной скважины, методику его применения и создать конструкции подземного и наземного оборудования скважин для осуществления разработанного метода.

**Объекты:** лабораторный стенд с приспособлением моделирующего канал в породе; гидропескоструйный перфоратор при гидропескоструйном вскрытии; фиксатор гидравлический, предназначенный для предупреждения обрыва и снятия растягивающих напряжений в колонне труб при гидропескоструйном вскрытии и для фиксации при центровании перфоратора в заданном интервале обработки; кислотный раствор на основе соляной кислоты объемом 3–4 м<sup>3</sup>; продавочная жидкость.

**Методы.** Экспериментальное исследование величины давления в канале при точечной гидропескоструйной перфорации проводили на стенде. В приспособлении устанавливали насадку и штуцер определенных диаметров –  $d$  и  $D$  – на необходимом расстоянии между ними. Насосным агрегатом прокачивали жидкость при давлении перед насадкой  $p_1$  и фиксировали давление внутри патрубков  $p_2$ . В опытах в качестве рабочей жидкости использовали воду и водный раствор сульфит-спиртовой барды с вязкостью 12,65 сПз при температуре 20 °С. Процесс избирательной кислотной обработки состоит в том, что в скважину спускают гидропескоструйный перфоратор, устанавливая его на уровне выбранного интервала обработки, и гидравлические фиксаторы, необходимые для строгого удержания перфоратора. После этого закачивают 3–4 м<sup>3</sup> кислотного раствора и продавочную жидкость. Затем в насосно-компрессорные трубы и затрубное пространство нагнетают воздух или газ (до максимального давления в распределительной будке), и в таком состоянии скважину оставляют под давлением на 20 ч, и по окончании скважину дреннируют для извлечения продуктов реакции на поверхность.

**Результаты.** Из анализа результатов многократной (трехкратной) гидрокислотной обработки видно, что первоначальное давление закачки кислотного раствора после первого этапа обработки скважины было снижено на 24 %, а после второго – на 55 %. Метод кислотной обработки с дополнительной точечной перфорацией призабойной зоны эксплуатационных скважин позволяет более эффективно проводить процесс обработки. В результате увеличивается объем притока пластовой жидкости из пласта в скважину на 20...30 % в сравнении с обычной кислотной обработкой.

### Ключевые слова:

Канал, фильтрация, скорость, реакция, синтанол, реагент, вскрытие.

### Введение

Способ точечной гидропескоструйной перфорации при кислотной обработке скважин основан на получении следующего эффекта. В выбранном пропластке или участке пласта при помощи гидропескоструйной перфорации образовывается канал, в который затем через насадку перфоратора нагнетается кислотный раствор [1–6]. Входящая в канал струя кислотного раствора препятствует выходу этого раствора из канала, как бы «запирая» его.

В результате этого в канале возникает аномальное давление, которое всегда на какую-то величину больше пластового в этой зоне и определяемое по формуле [7]:

$$\Delta p = p_k - p_{пл},$$

где  $\Delta p$  – перепад давления между давлением в канале и пластовым в зоне образования канала;  $p_k$  – давление

в канале;  $p_{пл}$  – пластовое давление в зоне образования канала.

За счет перепада  $\Delta p$  кислотный раствор, находящийся в канале, фильтруется в его стенки и обрабатывает зону вокруг канала. И только часть кислотного раствора вытекает из канала в эксплуатационную колонну, попадая в другую, более дренированную зону пласта. Таким образом, этот способ позволяет производить строго избирательную кислотную обработку (а также любой другой вид обработки) с точностью до нескольких сантиметров, определяемой точностью контроля за установкой перфоратора.

Опытное изучение давления в канале при точечной гидропескоструйной перфорации проводили на стенде [8, 9]. Он состоит из приспособления, моделирующего канал в породе, которое заключено в кожух, регистрирующих манометров, пневматических ком-

пенсаторов давления и насосного агрегата с системой манифольдов.

Схема приспособления, моделирующего канал в породе [10], показана на рис. 1. К основанию – 4 сваркой прикреплены толстостенный переводник – 1 и гайка – 7. В переводник ввинчен корпус насадки перфоратора – 3 с насадкой – 2. В гайку – 7 ввинчен патрубок – 8 длиной 500 мм, изготовленный из 60-мм насосно-компрессорной трубы. С одной стороны патрубок закрыт заглушкой – 10, а с другой стороны он имеет втулку – 6 с резьбой. Во втулку ввинчивается штуцер – 5, моделирующий вход в канал.

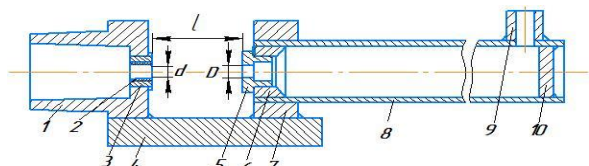


Рис. 1. Устройство, моделирующее процессы, происходящие в канале

Fig. 1. Device simulating the processes occurring in the channel

На патрубке – 8 к муфте – 9 присоединяется манометр. Ось насадки совпадает с осью штуцера и патрубка. Во избежание разбрызгивания жидкости приспособление заключено в кожух. В процессе исследования применяли насадки диаметром  $d_1=4,5$  мм и  $d_2=6$  мм.

Так как при точечной гидropескоструйной перфорации диаметр отверстия в обсадной колонне приблизительно равен 2,5–3,0 диаметрам насадки, были взяты штуцеры диаметром  $D_1=11,5$  мм,  $D_2=15$  мм и  $D_3=22$  мм. Расстояние от насадки до входа в канал  $l$  изменяли от 5 до 100 мм, вращая патрубок – 8 в гайке – 7.

Методика проведения опытов заключается в следующем. В приспособлении устанавливали насадку и штуцер определенных диаметров –  $d$  и  $D$  – на необходимом расстоянии между ними. Насосным агрегатом прокачивали жидкость при давлении перед насадкой  $p_1$  и фиксировали давление внутри патрубка  $p_2$ . В опытах в качестве рабочей жидкости использовали воду и водный раствор сульфит-спиртовой барды (ССБ) с вязкостью 12,65 сПз при температуре 20 °С.

Из таблицы видно, что на исследованном участке изменения расстояния от насадки до входа в канал –  $l$  от 5 до 100 мм наблюдаются три характерные особенности изменения  $p_2$  в зависимости от отношения диаметра входного отверстия в канал к диаметру насадки  $D/d$ . При отношении  $D/d > 2,55$  с увеличением  $d$  давление  $p_2$  возрастает. При  $D/d < 2,55$  с увеличением  $d$  давление  $p_2$  убывает. При  $D/d \approx 2,55$  с увеличением  $d$  давление  $p_2$  сначала возрастает, а затем убывает.

Зависимость  $p_2=f(p_1)$  всегда такова, что с увеличением  $p_1$  увеличивается  $p_2$ . Однако характер этого изменения зависит от отношения  $D/d$ , что видно из следующих данных.

$\frac{D}{d}$	...1,91...	...2,5...	...2,55...	...3,33...	...3,67...	...4,88
$\frac{p_2}{200}$	...0,85...	...0,36...	...0,32...	...0,094...	...0,09...	...0,03

Следует отметить, что при проведении опытов на стенде возникли значительные затруднения при регистрации давления  $p_2$ . Несмотря на применение двух пневматических компенсаторов высокого давления и трубчатых компенсаторов, наблюдались сильные колебания давления  $p_2$ , не позволившие достаточно точно зафиксировать его среднюю величину (определенную роль в этом явлении сыграло отсутствие противодействия на выходе струи из насадки).

Как показали проведенные исследования, в канале можно получить очень высокие избыточные давления, до 31 % от давления перед насадкой, которые достаточны для проведения не только избирательной кислотной обработки, но и избирательного гидроразрыва пласта. Например, при перепаде давления в насадке, равном 20,0 МПа, и диаметре 4,5 мм избыточное давление в канале может составить 6,2 МПа. Эти работы можно проводить в эксплуатационных колоннах минимальной прочности с дефектом большого диаметра, т. е. там, где даже невозможна установка пакеров [11–15]. Процесс избирательной кислотной обработки состоит в следующем (рис. 2).

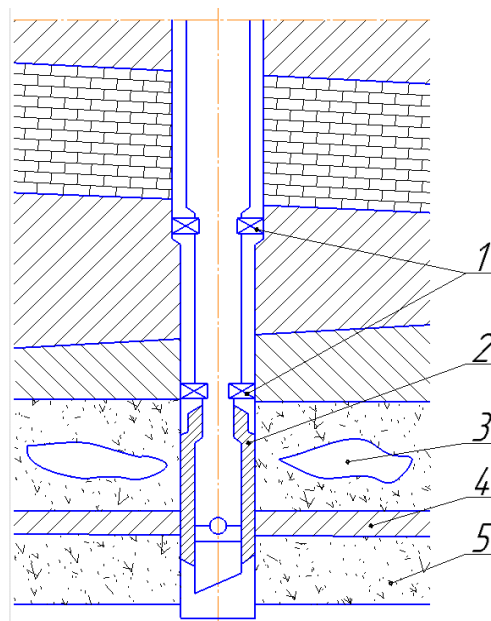


Рис. 2. Процесс избирательной кислотной обработки: 1 – фиксатор; 2 – перфоратор; 3 – канал; 4 – обрабатываемый малопроницаемый участок; 5 – хорошо проницаемый пропласток

Fig. 2. Selective acid treatment: 1 – fixative; 2 – puncher; 3 – channel; 4 – processed low-permeability area; 5 – well-permeable interlayer

В скважину спускают гидropескоструйный перфоратор – 2, устанавливая его на уровне выбранного интервала обработки, и гидравлические фиксаторы, необходимые для строгого удержания перфоратора. Смещение последнего исключает возможность избирательной обработки [16–19]. Характер изменения давления в канале  $p_2=f(l)$  в зависимости от расстояния между насадкой и входом в канал для различных отношений  $D/d$  представлен в таблице.

**Таблица.** Характер изменения давления в канале  $p_2=f(l)$  в зависимости от расстояния между насадкой и входом в канал для различных отношений  $D/d$ .

**Table.** Nature of the change in pressure in the channel  $p_2=f(l)$  depending on the distance between the nozzle and the inlet to the channel for various  $D/d$  ratios

№ опыта Experiment no.	Рабочая жидкость Working fluid	Диаметр шту- цера $D$ , мм Union diameter $D$ , mm	Диаметр насадки $d$ , мм Nozzle diameter $d$ , mm	Отноше- ние $D/d$ $D/d$ ratio	Характер зависимости $p_2=f(l)$ The nature of dependence $p_2=f(l)$
1	Вода/Water	11,5	4,5	2,55	$p_2$ сначала возрастает, а затем убывает $p_2$ first increases and then decreases
2	<<	15,0	4,5	3,33	$p_2$ сначала убывает, а затем возрастает $p_2$ first decreases and then increases
3	<<	22,0	4,5	4,88	$p_2$ убывает/ $p_2$ decreases
4	<<	15,0	6,0	2,50	$p_2$ сначала убывает, а затем возрастает $p_2$ first decreases and then increases
5	<<	22,0	6,0	3,67	то же/the same
6	Раствор ССБ PRS solution	11,5	4,5	2,55	$p_2$ убывает/ $p_2$ decreases
7	<<	15,0	4,5	3,33	$p_2$ возрастает/ $p_2$ increases
8	<<	22,0	4,5	4,88	то же/the same
9	<<	11,5	6,0	1,91	$p_2$ убывает/ $p_2$ decreases
10	<<	15,0	6,0	2,50	то же/the same
11	<<	22,0	6,0	3,67	–

После обычного гидрорескоструйного вскрытия и промывки скважины от песка, не изменяя положения перфоратора, в трубы прокачивают кислотный раствор, который, входя в образованный канал, фильтруется через его стенки в обрабатываемый участок пласта [20]. Часть кислоты, которая после окончания обработки скопилась в стволе скважины, продавливается в пласт продавочной жидкостью через кольцевое пространство.

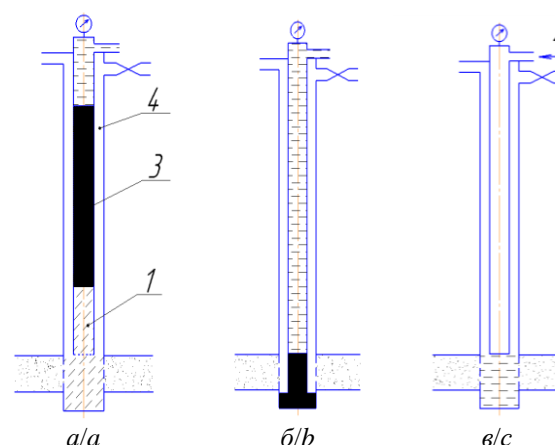
Фиксатор гидравлический (ФГ) предназначен для предупреждения обрыва и снятия растягивающих напряжений в колонне труб при гидрорескоструйном вскрытии, а также для фиксации при центровании перфоратора в заданном интервале обработки.

Иногда кислотные обработки оказываются безуспешными, так как призабойная зона сильно засорена. В этих случаях применяют гидрокислотный разрыв. Однако его проведение ограничивается высокими давлениями, необходимыми для продавливания кислоты через плохо проницаемую зону, или же требует специального оборудования (пакеры, якоря, устьева арматура, насосные агрегаты высокого давления и т. д.).

Особенно значительные давления, опасные для герметичности эксплуатационной колонны, возникают в скважинах большой глубины с плотными слабопроницаемыми коллекторами. Для того чтобы давление при обработке не превосходило прочности оборудования, был внедрен метод многократной гидрокислотной обработки по следующей технологии.

Сначала фильтруемую зону очищают от песчаной пробки (если она имеется), затем насосно-компрессорные трубы спускают до фильтра (рис. 2), а устье скважины оборудуют соответствующей арматурой, рассчитанной на высокое давление. После этого закачивают 3–4 м<sup>3</sup> кислотного раствора (рис. 3, а) и продавочную жидкость (рис. 3, б). Затем в насосно-компрессорные трубы и затрубное пространство нагнетают воздух или газ (до максимального давления в распределительной будке). В таком состоянии

скважину оставляют под давлением на 20 ч (рис. 3, в), после чего скважину дренируют для извлечения продуктов реакции на поверхность. Так же проводят повторную гидрокислотную обработку призабойной зоны, и при необходимости эту операцию повторяют еще раз.



**Рис. 3.** Технологическая схема проведения одного цикла многократной гидрокислотной обработки: 1 – вода; 2 – воздух под давлением; 3 – нефть; 4 – кислотный раствор; а) закачка 3–4 м<sup>3</sup> кислотного раствора; б) закачка продавочной жидкости; в) скважина остается под давлением на 20 ч

**Fig. 3.** Technological scheme of carrying out a cycle of multiple hydroacid treatment: 1 – water; 2 – air under pressure; 3 – oil; 4 – acidic solution; а) injection of 3–4 m<sup>3</sup> of acid solution; б) injection of displacement fluid; в) the well remains under pressure for 20 hours

Из анализа результатов многократной (трехкратной) гидрокислотной обработки видно, что первоначальное давление закачки кислотного раствора после первого этапа обработки скважины было снижено на 24 %, а после второго – на 55 %. Испытания данного метода проводили на скважинах месторождения

НГДУ «Туймазанефть» АНК Башнефть. Например, для скв 172 дебит нефти увеличился от 3,8 до 6,3 т/сут. Обычная гидрокислотная обработка не дала подобных результатов.

Часто перед закачкой кислотного раствора проводят профилактические мероприятия для уменьшения устьевого давления при обработке, одно из них – мгновенное снижение давления на забое.

Эффективное проникновение кислотного раствора в пласт определяется рядом факторов, наиболее важными из которых являются:

- 1) время истощения кислотного раствора заданной концентрации в пластовых условиях;
- 2) скорость закачки его в пласт.

Необходимо отметить, что после полного истощения кислотного раствора дальнейшее проникновение его в пласт не только не приносит пользы, но даже вредно, так как истощенный раствор не расширяет, а лишь заполняет поровые каналы.

Увеличить время истощения кислотного раствора, т. е. замедлить скорость реакции, можно, добавив в раствор специальные реагенты. Так, весьма эффективным препаратом, понижающим скорость реакции,

является синтанол ДС-10 ТУ 2483-016-71150986-2012 (представляет собой неионогенный ПАВ и предназначен для применения в качестве эффективного поверхностно-активного вещества). Добавка его в количестве 0,5 % (по весу от объема раствора) может снизить скорость реакции в 2,7 раза.

Увеличить же скорость закачки кислотного раствора в сильно дренированные пласты малодебитных скважин (до 5–10 т/сутки жидкости) с низким пластовым давлением значительно сложнее из-за недостаточной мощности применяемых кислотных агрегатов.

#### Заключение

Применение метода кислотной обработки с дополнительной точной перфорацией призабойной зоны эксплуатационных скважин позволяет более эффективно проводить процесс. В результате увеличивается объем притока пластовой жидкости из пласта в скважину на 20...30 % в сравнении с обычным кислотным воздействием. Причем предлагаемый метод интенсификации добычи пластовой жидкости не предполагает использования значительных дополнительных материальных затрат.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Zhang H., Liang Y., Zhou X. Sensitivity analysis and optimal operation control for large-scale water flooding pipeline network of oilfield // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 154. – P. 38–48.
3. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of optimal design of a universal device for nonstationary pulse pumping of liquid in a reservoir pressure maintenance system // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – V. 54. – Iss. 3–4. – P. 225–232. DOI: 10.1007/s10556-018-0467-2.
4. Эффективность кислотных обработок нагнетательных скважин / К.Ш. Ямалетдинова, А.Ш. Халадов, Ю.В. Дудников, А.А. Ямалетдинова, А.Р. Габдуллин // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 12. – С. 278–283. URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36642> (дата обращения: 24.12.2020).
5. Кислотная обработка призабойной зоны пласта баженовской свиты после проведения гидроразрыва пласта / В.Т. Литвин, К.В. Стрижнев, Т.Н. Шевчук, П.В. Рошин // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 4. – С. 70–73.
6. Meirmanov A., Nekrasova I. Mathematical models of a hydraulic shock // Journal of mathematical analysis and applications. – 2013. – V. 408. – Iss. 1. – P. 76–90.
7. Studying heat-affected zone deformations of electric arc welding / R.I. Suleimanov, L.Z. Zainagalina, M.Y. Khabibullin, L.M. Zaripova, N.O. Kovalev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – P. 032053. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032053.
8. Кислотные обработки: составы, механизмы реакций, дизайн / В.Н. Глушенко, О.А. Пташко, Р.Я. Харисов, А.В. Денисова. – Уфа: Гилем, 2010. – 392 с.
9. Kadochnikova L.M., Pichugin O.N., Chebakov A.A. Analytical technique for gel treatment prediction of production and injection wells in a stratified reservoir // Iranian Journal of Science & Technology. – 2002. – Transaction B. – V. 26. – B2. – P. 205–216.
10. Zaichenko A.Yu., Glazov S.V., Salgansky E.A. Filtration combustion of viscous hydrocarbon liquids // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2017. – V. 51. – Iss. 5. – P. 673–679.
11. The application of X-ray Micro Computed Tomography (MicroCT) of core sample for estimation of physicochemical treatment efficiency / M.S. Orlov, P.V. Roschin, I.A. Struchkov, V.T. Litvin // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 2015. SPE-176600-MS. DOI: 10.2118/176600-MS.
12. Коннов Ю.Д., Сидоркин Д.И., Хабибуллин М.Я. Механизация технологического процесса спуско-подъемных операций при текущем и капитальном ремонте скважин // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2018. – № 2. – С. 15–24. DOI: 10.5510/OGP20180200346.
13. Assem A.I., Nasr-El-Din H.A., De Wolf C.A. Formation damage due to iron precipitation in carbonate rocks // SPE European Formation Damage Conference & Exhibition. – 2013. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/165203-MS> (дата обращения: 24.12.2020).
14. Wenyue S., Mun-Hong H. Forecasting and uncertainty quantification for naturally fractured reservoirs using a new dataspaces inversion procedure // 15th Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR). – Amsterdam, Netherlands: European Assoc. Geoscientists & Engineers Computational geosciences, 2017. – V. 21. – Iss. 5–6. – P. 1443–1458.
15. Abdyukova R.Y. Studies on operation and types of drilling pump valves // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012050.
16. Rady A. Iron precipitation in calcite, dolomite and sandstone cores // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/176574-MS> (дата обращения: 24.12.2020).
17. Rabie A.I. Sodium gluconate as a new environmentally friendly iron-controlling agent for HP/HT acidizing treatments // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/172640-MS> (дата обращения: 24.12.2020).
18. Литвин В.Т., Стрижнев К.В., Рошин П.В. Особенности строения и интенсификации притоков нефти в сложных коллекторах баженовской свиты Пальяновского месторождения // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. – Т. 10. – № 3. URL: [http://www.ngtp.ru/rub/11/36\\_2015.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/11/36_2015.pdf) (дата обращения: 24.12.2020).
19. Гилаев Ген.Г., Хабибуллин 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.
20. Nsoga V.N., Hona J., Pemha E. Numerical simulation of heat distribution with temperature-dependent thermal conductivity in a two-dimensional liquid flow // International Journal of nonlinear sciences and numerical simulation. – 2017. – V. 18. – Iss. 6. – P. 507–513.
- Поступила 13.01.2021 г.*

#### **Информация об авторах**

**Хабибуллин М.Я.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Октябрьский.

**Гилаев Г.Г.**, доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазового дела, Кубанский государственный технологический университет, Институт нефти, газа и энергетики.

UDC 622.279.72

## INCREASING THE EFFICIENCY OF WELL SELECTIVE ACID TREATMENT BY APPLYING PRECISION HYDRO-SAND BLASTING

**Marat Ya. Khabibullin**<sup>1</sup>,  
m-hab@mail.ru

**Gani G. Gilaev**<sup>2</sup>,  
gggilaev@gmail.com

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technical University, branch in Oktyabrsky,  
54 a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

<sup>2</sup> Kuban State Technological University,  
88, Starokubanskaya street, Krasnodar, 350058, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to ensure the point distribution of acid solution during acid treatment of the bottomhole zone of the production well. Using this method, the efficiency of this process increases by deeper dissolution of limestone rock in the bottomhole zone of the well and thereby completely opening channels for the flow of formation fluid from the formation into the well.

**The aim** of the research is to develop and propose a method of point hydrosand-jet perforation during acid treatment of the bottomhole zone of a production well, a methodology for its application, and to create designs for underground and surface equipment of wells for implementing the developed method.

**Objects:** laboratory stand with a device simulating a channel in the rock; hydrosand-jet perforator for hydrosand-jet opening; clamp designed to prevent breakage and relieve tensile stresses in the pipe string during hydrosand-jet opening and for fixing when centering the perforator in a given processing interval; acid solution based on hydrochloric acid with a volume of 3–4 m<sup>3</sup>; displacement fluid.

**Methods.** The experimental study of the pressure in the channel at point hydrosand-jet perforation was carried out on a stand. In the device, a nozzle and a fitting of certain diameters –  $d$  and  $D$  – were installed at the required distance between them. The pumping unit was used to pump the liquid at a pressure  $p_1$  before the attachment, and the pressure inside the branch pipe  $p_2$  was recorded. In the experiments, water and aqueous solution of sulfite-alcohol stillage with a viscosity of 12,65 cPz at 20 °C were used as the working fluid. The selective acidizing consists in the fact that a hydrosand-jet perforator is lowered into the well, set at the level of the selected treatment interval, and hydraulic clamps necessary to strictly hold the perforator. After that 3–4 m<sup>3</sup> of acid solution and squeezing fluid are pumped in. Then, air or gas is injected into the tubing and the annular space (up to the maximum pressure in the distribution booth) and in this state the well is left under pressure for 20 hours and at the end the well is drained to extract the reaction products to the surface.

**Results.** From the analysis of the results of multiple (threefold) hydro-acid treatment, it can be seen that the initial injection pressure of the acid solution after the first stage of the well treatment was reduced by 24 %, and after the second – by 55 %. The acidizing method with additional accurate perforation of the bottomhole zone of production wells allows implementing a more efficient treatment. As a result, the volume of formation fluid inflow from the formation into the well increases by 20...30 % in comparison with conventional acidizing.

### Key words:

Channel, filtration, speed, reaction, synthanol, reagent, opening.

### REFERENCES

- Gilaev G.G., Manasyan A.E., Fedorchenko G.D., Kolesnikov V.A., Kologreev I.A. Oil deposits in the carbonate deposits of the Famennian stage of the Samara region: the history of discovery and prospects of search. *Oil industry*, 2013, no. 10, pp. 38–40. In Rus.
- Zhang H., Liang Y., Zhou X. Sensitivity analysis and optimal operation control for large-scale waterflooding pipeline network of oilfield. *Journal of petroleum science and engineering*, 2017, vol. 154, pp. 38–48.
- Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of optimal design of a universal device for nonstationary pulse pumping of liquid in a reservoir pressure maintenance system. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 54, Iss. 3–4, pp. 225–232. DOI: 10.1007/s10556-018-0467-2.
- Yamaletdinova K.Sh., Khaladov A.Sh., Dudnikov Yu.V., Yamaletdinova A.A., Gabdullin A.R. The effectiveness of acid treatments for injection wells. *Successes modern science*, 2017, no. 12, pp. 278–283. In Rus. Available at: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36642> (accessed: 24 December 2020).
- Litvin V.T., Strizhnev K.V., Shevchuk T.N., Roshchin P.V. Acid treatment bottomhole formation zone of the Bazhenov formation after hydraulic fracturing layer. *Oil industry*, 2018, no. 4, pp. 70–73. In Rus.
- Meirmanov A., Nekrasova I. Mathematical models of a hydraulic shock. *Journal of mathematical analysis and applications*, 2013, vol. 408, Iss. 1, pp. 76–90.
- Suleimanov R.I., Zainagalina L.Z., Khabibullin M.Y., Zaripova L.M., Kovalev N.O. Studying heat-affected zone deformations of electric arc welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, p. 032053. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032053.
- Glushchenko V.N., Ptashko O.A., Kharisov R.Ya., Denisova A.V. *Kislotnye obrabotki: sostavy, mekhanizmy reaktsiy, disayn* [Acid treatments: compositions, reaction mechanisms, design]. Ufa, Guillem Publ., 2010. 392 p.
- Kadochnikova L.M., Pichugin O.N., Chebakov A.A. Analytical technique for gel treatment prediction of production and injection wells in a stratified reservoir. *Iranian Journal of Science & Technology*, 2002, Transaction B, vol. 26, B2, pp. 205–216.
- Zaichenko A.Yu., Glazov S.V., Salgansky E.A. Filtration combustion of viscous hydrocarbon liquids. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2017, vol. 51, Iss. 5, pp. 673–679.
- Orlov M.S., Roschin P.V., Struchkov I.A., Litvin V.T. The application of X-ray Micro Computed Tomography (Micro-CT) of core sample for estimation of physicochemical treatment efficiency. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2015. SPE-176600-MS. DOI: 10.2118/176600-MS.
- Konnov Yu.D., Sidorkin D.I., Khabibullin M.Ya. Mechanization of the technological process of tripping and lifting operations during routine and overhaul of wells. *Scientific works of NIPi Neftegaz SOCAR*, 2018, no. 2, pp. 15–24. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20180200346.



13. Assem A.I., Nasr-El-Din H.A., De Wolf C.A. Formation damage due to iron precipitation in carbonate rocks. *SPE European Formation Damage Conference & Exhibition*, 2013. Available at: <http://dx.doi.org/10.2118/165203-MS> (accessed: 24 December 2020).
14. Wenye S., Mun-Hong H. Forecasting and uncertainty quantification for naturally fractured reservoirs using a new data-space inversion procedure. *15<sup>th</sup> Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR)*. Amsterdam, Netherlands, European Assoc. Geoscientists & Engineers Computational geosciences, 2017. Vol. 21, Iss. 5–6, pp. 1443–1458.
15. Abdyukova R.Y. Studies on operation and types of drilling pump valves. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, pp. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012050.
16. Rady A. Iron precipitation in calcite, dolomite and sandstone cores. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.2118/176574-MS> (accessed: 24 December 2020).
17. Rabie A.I. Sodium gluconate as a new environmentally friendly iron-controlling agent for HP/HT acidizing treatments. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.2118/172640-MS> (accessed: 24 December 2020).
18. Litvin V.T., Strizhnev K.V., Roshchin P.V. Features of the structure and intensification oil inflows in complex reservoirs of the Bazhenov formation of the Palyanovsky deposits. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2015, vol. 10, no. 3. In Rus. Available at: [http://www.ngtp.ru/rub/11/36\\_2015.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/11/36_2015.pdf) (accessed: 24 December 2020).
19. 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. In Rus.
20. Nsoga V.N., Hona J., Pemha E. Numerical simulation of heat distribution with temperature-dependent thermal conductivity in a two-dimensional liquid flow. *International Journal of nonlinear sciences and numerical simulation*, 2017, vol. 18, Iss. 6, pp. 507–513.

*Received: 13 January 2021.*

#### Information about the authors

**Marat Ya. Khabibullin**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technical University, branch in Oktyabrsky.

**Gani G. Gilaev**, Dr. Sc., professor, Kuban State Technological University.

УДК 622.276

## ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СЛАБОКОНСОЛИДИРОВАННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ВЯЗКОЙ НЕФТИ

Ильясов Ильнур Рустамович<sup>1</sup>,  
ilnur\_ilyasov@mail.ru

Грачев Сергей Иванович<sup>2</sup>,  
grachevsi@tyuiu.ru

<sup>1</sup> Акционерное общество «Мессояханефтегаз»,  
Россия, 625048, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 8Б.

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

**Актуальность.** Восточно-Мессояхское месторождение является уникальным не только по размеру геологических запасов, но и по своим геологическим особенностям. Основной продуктивный пласт ПК1-3 содержит около 65 % запасов и представляет собой слабоконсолидированный коллектор с высоковязкой нефтью. Опыта разработки аналогичных месторождений в условиях материковой Арктики практически нет. Исследование геолого-физических особенностей разработки слабоконсолидированных коллекторов вязкой нефти является актуальной задачей.

**Цель:** провести анализ и выявить ключевые геолого-физические особенности разработки слабоконсолидированных коллекторов вязкой нефти для поиска методов и технологий повышения эффективности их разработки.

**Объекты:** эксплуатационные слабоконсолидированные коллектора вязкой нефти Восточно-Мессояхского месторождения.

**Методы:** критический анализ, контент-анализ, анализ и обобщение имеющегося опыта разработки слабоконсолидированных коллекторов вязкой нефти на примере пласта ПК 1-3 Восточно-Мессояхского месторождения.

**Результаты.** Проведен критический анализ результатов исследования ключевых геолого-физических характеристик пласта ПК 1-3 и его флюидов, которые необходимо учитывать для его максимально эффективной разработки. Составлен перечень ключевых особенностей. Показано их влияние на эффективность разработки. Проведен анализ опыта заводнения, анализ работы аквифера и его влияния на режим разработки. Доказана необходимость применения вторичных методов разработки пласта ПК 1-3 и системы поддержания пластового давления. Однако ввиду описанных выше особенностей традиционное заводнение слабоконсолидированных коллекторов вязкой нефти сопряжено с высокими рисками прорывов воды и низким коэффициентом охвата пласта заводнением, что будет оказывать большое влияние на эффективность разработки и конечный коэффициент извлечения нефти. Сделан вывод об необходимости исследования альтернативных технологий и агентов заводнения слабоконсолидированных коллекторов вязкой нефти, в том числе с применением физико-химических методов увлечения нефтеотдачи с системным подходом, что является актуальной и интересной задачей.

### Ключевые слова:

Слабоконсолидированный коллектор, вязкая нефть, заводнение, геолого-физические свойства, разработка месторождений.

### Введение

Восточно-Мессояхское месторождение (ВММ) географически расположено в 340 км севернее г. Новый Уренгой на Гыданском полуострове и является самым северным разрабатываемым месторождением в России.

Основным объектом разработки Восточно-Мессояхского месторождения является пласт ПК1-3, содержащий 65 % начальных геологических запасов нефти. Продуктивные отложения пласта ПК1-3 на месторождении выделены в кровельной части песчаных отложений покурской свиты (уватский горизонт, сеноманский ярус).

### Обстановки осадконакопления

Апт-альб-сеноманские отложения в пределах Восточно-Мессояхского месторождения [1] попадают в пределы Тазовско-Уренгойского литофациального района.

Отличительной особенностью отложений покурской свиты является сложность и неоднозначность корреляции отдельных пластов ввиду отсутствия вы-

держанных по простиранию реперных границ внутри интервала свиты, что связано с преимущественно континентальными условиями формирования слагающих свиту отложений. Уверенными границами являются только кровля и подошва отложений покурской свиты, к которым приурочены региональные сейсмогоризонты «Г» (кровля) и «М» (подошва покурской свиты). В пределах изучаемого месторождения мощность отложений покурской свиты изменяется от 870 до 980 м.

Один из способов корреляции отложений покурской свиты [2] заключается в определении границ секвенций (сиквенсов), связанных с региональным изменением относительного уровня моря (ОУМ). Для этого предлагается использовать суммарную кривую каротажа альфа потенциала собственной поляризации (АПс), полученную путем суммирования кривых АПс отдельных скважин в изохронных границах (между сейсмогоризонтами «Г» и «М»). Полученная таким образом кривая АПс отражает глобальные изменения ОУМ, происходившие на изучаемой территории, с которыми связаны границы секвенций.

Данный метод реализован на ВММ, на рис. 1 приведена средняя кривая АПс (нормированная кривая ПС в интервале покурской свиты имеется в наличии), полученная по всем скважинам, вскрывающим всю мощность отложений покурской свиты (большая часть фонда поисково-разведочных скважин). В интервале отложений пласта ПК1-3 ( $\approx 120$  м от кровли свиты) на средней кривой АПс отмечается цикличность: резкие переходы от глинистых отложений (пониженные показания АПс) к песчаным (повышенные показания АПс) могут быть связаны с изменением условий формирования отложений (изменением ОУМ).

На основе средней кривой АПс интервал отложений пласта ПК1-3 разделен на три части, каждая из которых отождествляется с интервалами циклитов (А, В, С), выделенных ранее по литологическому признаку. Граница «кровля циклита В», отделяющая отложения приливно-отливной равнины от нижележащих отложений руслового комплекса, диагностируется уверенно по средней кривой АПс на расстоянии примерно 13 м от кровли сеномана (ОГ «Г»). Определение этой границы по отдельным скважинам в большинстве случаев уверенно, граница определена на расстоянии от 8 до 19 м от кровли сеномана, в среднем составляя 13 м.

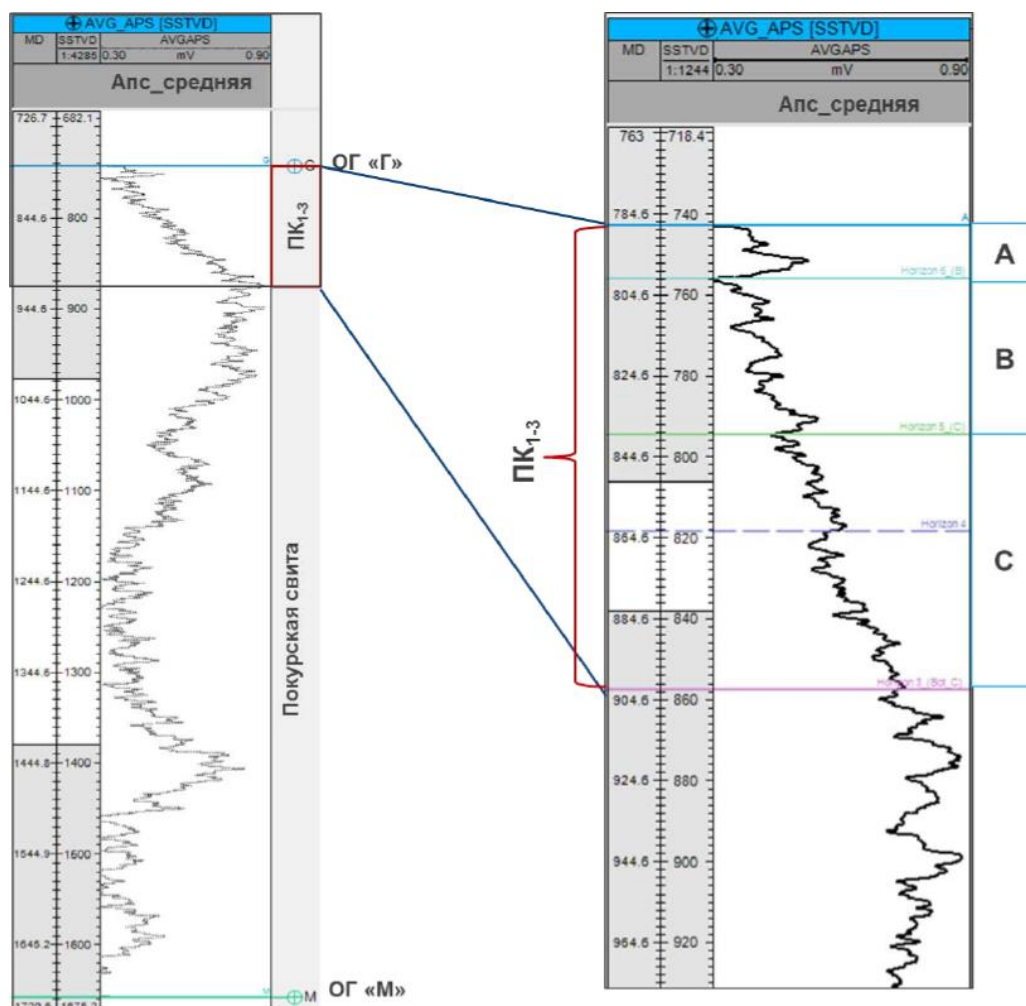


Рис. 1. Средняя кривая каротажа альфа потенциала собственной поляризации в интервале отложений пласта ПК 1-3  
 Fig. 1. Mean alpha spontaneous potential log in the range of PK 1-3 deposit

Несколько сложнее выглядит разделение отложений циклитов «В» и «С». Согласно средней кривой АПс граница «кровля циклита С» находится на расстоянии примерно 55 м ниже кровли сеномана и соответствует переходу от заглинизированных песчаников (пониженные значения АПс) к более «чистым» (повышенные значения АПс). Однако прослеживание данной границы в отдельных скважинах затруднительно ввиду наличия песчаных отложений циклита «В», врезающихся в отложения циклита «С». Как показывает анализ, возможны несколько видов контакта между

русловыми отложениями циклитов «В» и «С»: контактные русловые отложения, неконтактные с эрозивным врезанием и без, единичные русла или полное отсутствие русловых отложений в интервале циклита «В». Сама по себе литологическая граница, отделяющая отложения с повышенными фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) (русловые отложения), имеет большое практическое значение – картирование наиболее высокопродуктивных отложений – поэтому разумно принять для работы именно литологическую границу, а не изохронную. Однако латеральная связан-

ность между коллекторами определяется их первичным взаимным расположением во время седиментации, т. е. описывается изохронными границами. Учесть этот фактор можно, используя в качестве подошвы циклита «С» изохронную границу, определенную в разрезе каждой скважины с учетом средней кривой АПс (близкий к средней кривой реперный глинистый пропласток по данным геофизических исследований конкретной скважины), а разделение интервала циклита «С» на элементарные слои (нарезку) выполнить конформно подошве циклита (изохронной границе). Для интервала отложений циклита «В» изохронной границей служит

кровля циклита «В»: как уже было описано выше, результаты корреляции по литологическому признаку в большинстве скважин хорошо согласуются с данными по средней кривой АПс.

Результаты разделения пласта ПК 1-3 на циклиты показаны на рис. 2 [1, 3].

Предположительно отложения начали формироваться за счет деятельности мощной системы меандрирующей реки, наблюдаемой в интервале циклита «С». Затем меандрирующая система сменяется на обстановку дельтовой равнины, что диагностируется в интервале циклита «В».

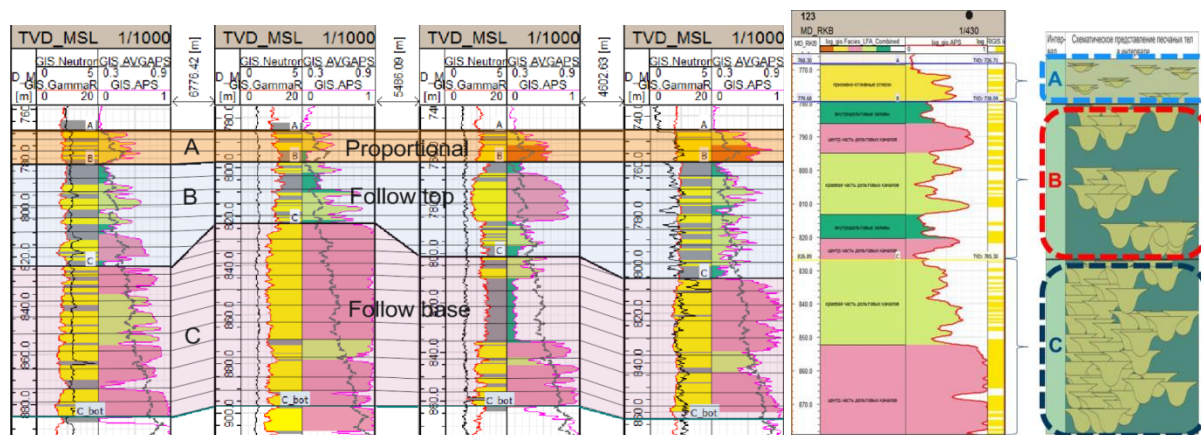


Рис. 2. Разделение пласта ПК 1-3 на циклиты

Fig. 2. Division of PK 1-3 reservoir on cyclets

При этом, если в интервале циклита «В» в дельте преобладают флювиальные процессы (влияние континента), к моменту образования отложений циклита «А» доминирующая роль переходит к приливно-отливным процессам – влияние моря.

#### Выделение ассоциаций фаций и их геолого-физическая характеристика

В модифицированной форме отложения пласта ПК1-3 представлены следующими ассоциациями фаций:

- 1) приливно-отливная отмель;
- 2) приливно-отливная гряда;
- 3) краевая часть дельтовых каналов/краевая часть пояса меандрирования;
- 4) центральная часть дельтовых каналов/центральная часть пояса меандрирования;
- 5) внутридельтовый залив/временно заливаемый участок поймы [4–10].

Исходя из сопоставления коэффициента пористости с остаточной водонасыщенностью, пласт ПК1-3 охарактеризован керном довольно равномерно.

Коллекторы с меньшей остаточной водонасыщенностью обладают высокой пористостью, что соответствует теоретическим представлениям. Такая ситуация характерна для пластов, в которых основной параметр, контролирующий фильтрационные и емкостные свойства, – это распределение и количество глинистого материала.

Практически для всех отложений наблюдается большой радиус разлета точек, что свидетельствует

об их неоднородности и различной степени консолидированности. Уменьшение фильтрационных свойств в основном связано с уплотнением и вторичными процессами.

Лучшие фильтрационно-емкостные свойства приурочены к ассоциациям фаций центральной части дельтовых каналов/пояса меандрирования. Худшие – к ассоциациям фаций внутридельтовых заливов/временно заливаемых участков поймы.

Разные ассоциации фаций характеризуются единой зависимостью коэффициента пористости ( $K_p$ )-АПс, детализация их для каждой ассоциации фаций затруднительна. Использование остальных методов для установления количественных критериев «коллектор-неколлектор» и уточнения ФЕС отдельно для каждой фации пласта ПК1-3 недостаточно эффективно за счет влияния газонасыщенности, кавернозности ствола скважины в зоне неконсолидированных отложений, слабой дифференцированности кривых радиоактивного каротажа из-за большого диаметра скважин.

Как было отмечено ранее, для пласта ПК1-3 характерна цикличность и ухудшение фильтрационно-емкостных свойств вверх по разрезу. По результатам построения концептуальной модели пласта [1, 3], для каждого циклита – «А», «В» и «С» – было выделено от двух до трех типовых разрезов скважин, согласующихся с ассоциациями фаций.

Фильтрационные емкостные свойства и геолого-физическая характеристика выделенных типовых разрезов по циклитам пласта ПК1-3 представлены на рис. 3, 4.



Рис. 3. Фильтрационные-емкостные свойства типовых разрезов по циклитам  
 Fig. 3. Poro-permeability properties of typical well cross-section for each cycle

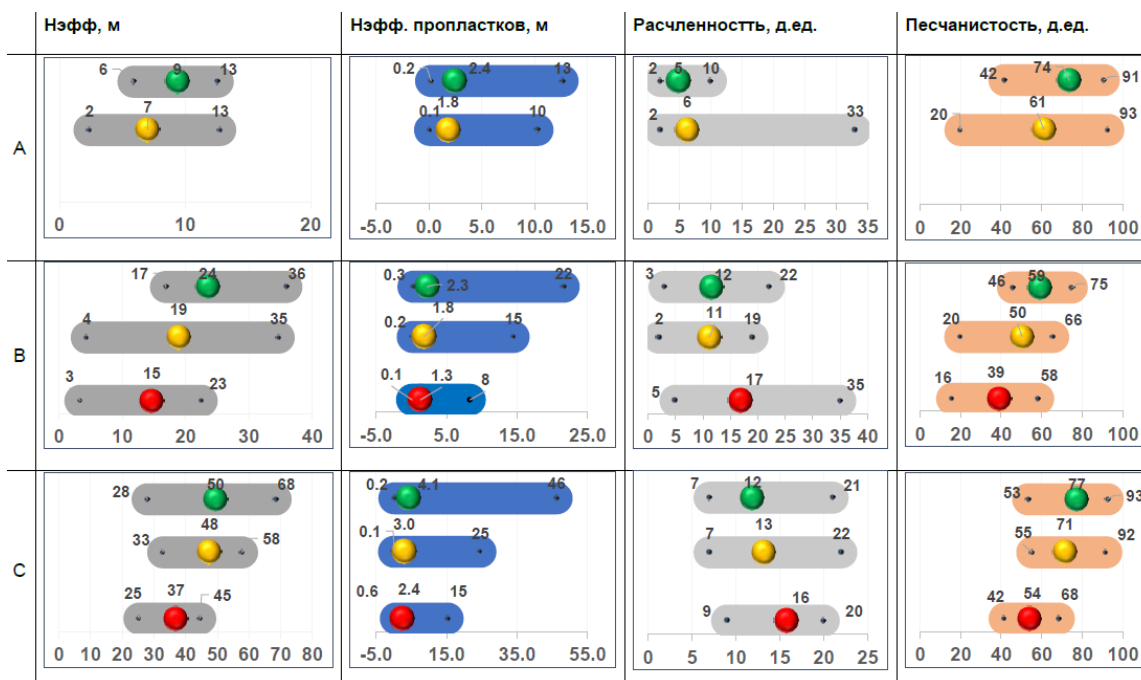


Рис.4. Геолого-физическая характеристика типовых разрезов по циклитам  
 Fig. 4. Geology-physical properties of typical well cross-section for each cycle

#### Гранулометрический и минералогический анализ

По данным гранулометрического анализа все представленные типы разреза имеют приблизительно одинаковую структуру со средним содержанием глинистости около 10–20 %. Во всех разрезах преобладает алевритовая фракция, доля которой может достигать 70–80 %, исключение составляют чистые неглинистые русловые отложения циклита «С», где доля песчаной фракции увеличивается.

Дополнительно были проанализированы суммарные содержания глинистых разностей в пределах каждого цикла. Следует отметить, что состав и со-

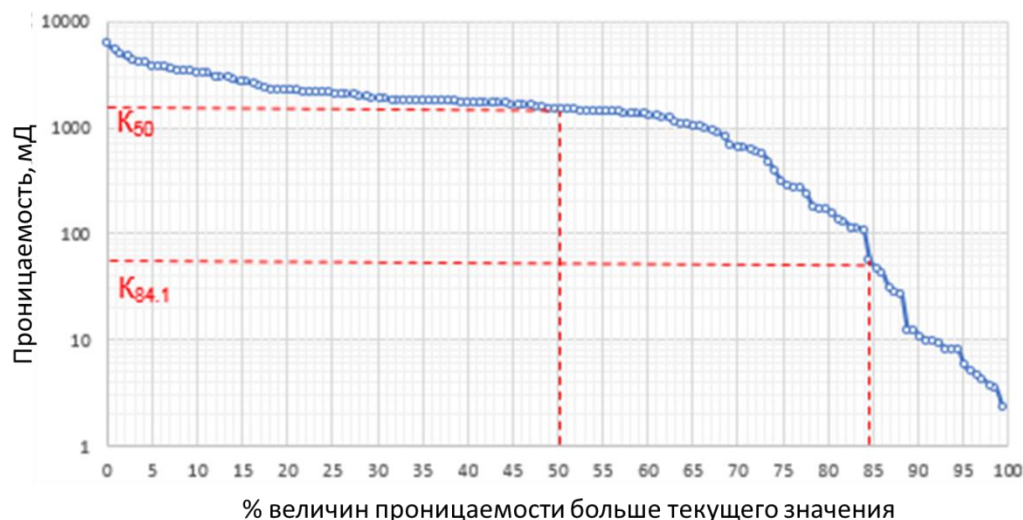
держание глинистых минералов в пределах каждого петротипа приблизительно одинаковые, также отмечается высокое содержание монтмориллонита и смешанно-слоистых образований, которые могут приводить к ухудшению свойств коллектора при взаимодействии с водой.

Как видно из всего вышесказанного, пласт ПК1-3 обладает очень высоким контрастом проницаемостей. Еще одним методом оценки анизотропии пласта является коэффициент Дикстра–Парсона. Суть метода заключается в нахождении коэффициента вариации проницаемости, который определяется статически и

представляет собой отношение величины стандартного отклонения к математическому ожиданию величины проницаемости [11]. Задача решается графически и находится коэффициент Дикстра–Парсона в диапа-

зоне от 0 до 1, где 0 – гомогенный однородный коллектор, 1 – гетерогенный неоднородный коллектор.

Коэффициент Дикстра–Парсона для типовой скважины ПК 1-3 показан на рис. 5.



% величин проницаемости больше текущего значения

Рис. 5. Графическое определение коэффициента Дикстра–Парсона для типовой скважины

Fig. 5. Graphical definition of the Duxtra Parsons coefficient for a typical well

Таким образом, для типовой скважины пласта ПК 1-3 коэффициент Дикстра–Парсона составляет 0,9, что еще раз подтверждает высокую неоднородность и гетерогенность коллектора.

#### Анализ положения контактов и градиентов давлений

В процессе анализа установлена зависимость положения уровня водонефтяного контакта (ВНК) от кровли циклита «В». Такая же зависимость установлена и для положения зеркала чистой воды (уровня нулевого капиллярного давления), подобранного для каждой скважины путем настройки расчета водонасыщенности по капиллярной модели к результатам расчета по данным геофизических исследований скважин. Такое поведение зеркала свободной воды и водонефтяного контакта является подтверждением наклонности водонефтяного контакта и может свидетельствовать о теории активной законтурной области. Для ее верификации выполнен анализ данных испытаний с применением прибора MDT (modular formation dynamics tester). Для залежей с активным напором в законтурной области характерно присутствие разных градиентов давлений в водяной части залежи, хотя, учитывая высокую плотность нефти, присутствие данного градиента может отличаться очень незначительно. На рис. 6 приведен график зависимости пластового давления от глубины по данным MDT.

На графике видно, что все скважины обладают единым градиентом в водонасыщенной части пласта ПК1-3, что указывает на единое динамическое состояние залежи. Поэтому в данном случае изменение уровня ВНК скорее обусловлено преобладанием первой (неотектонической) гипотезы формирования.

На основании выполненной работы текущее представление о геологическом строении отложений цик-

литов пласта ПК1-3 можно описать следующими тезисами:

- разрез пласта ПК1-3 состоит из трех интервалов (трех циклитов), разделенных литологическими границами;
- тектонические нарушения в пределах месторождения имеют преимущественно субмеридиональное простирание;
- между циклитами «А» и «В» есть зоны гидродинамической связи/разобщенности;
- циклиты «В» и «С» являются единым гидродинамически связанным объектом;

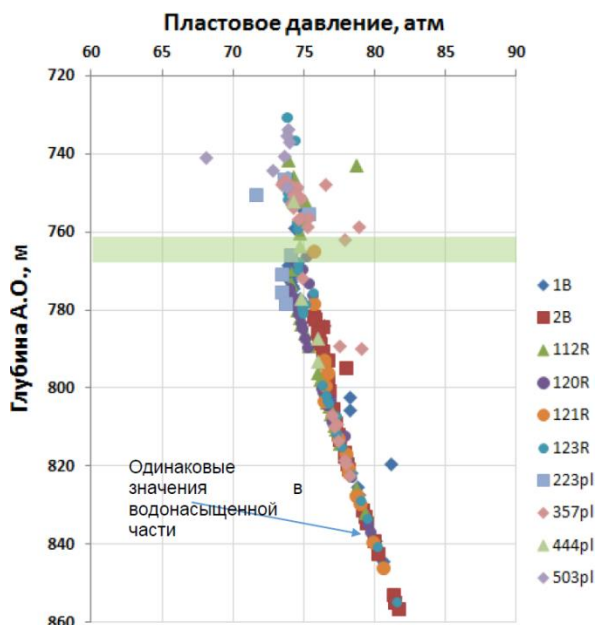


Рис. 6. Градиенты давлений по данным MDT

Fig. 6. Pressure gradients according to MDT

- в интервале отложений циклита «В» присутствует фациальная зональность, обуславливающая различное положение уровней флюидалных контактов и различную картину по разрезу скважин;
- отложения циклита «С» наиболее выдержаны по площади и по разрезу;
- в пределах сектора первоочередного бурения положение ВНК циклитов «В+С» изменяется в зависимости от структуры в интервале от  $-809,3$  м в купольной части до  $-819,8$  м в краевой.

#### Анализ физико-химических свойства нефти и газа

Относительный фазовые проницаемости в системе «нефть–вода»

Физико-химические свойства пластовых флюидов Восточно-Мессояхского месторождения изучались по данным исследования поверхностных и глубинных проб. Результаты лабораторных исследований глубинных проб пластовой нефти характеризуются широким диапазоном изменения ее свойств. Основная причина – предельно насыщенная нефть на ГНК, вследствие чего при создании даже небольшой депрессии отбор проб производится в условиях двухфазного потока. Свойства физической модели предельно насыщенной нефти соответствуют свойствам, полученным в результате расчетов на основе частично дегазированных, глубинных проб нефти, что подтверждает корректность математических методов оценки свойств пластовой нефти в условиях двухфазной залежи с использованием результатов лабораторных исследований частично дегазированных глубинных проб нефти. Основные физико-химические свойства пластовых флюидов ПК1-3 представлены в таблице и на рис. 7.

**Таблица.** Основные физико-химические свойства пластовых флюидов ПК1-3

**Table.** Main properties of reservoir fluids PK 1-3

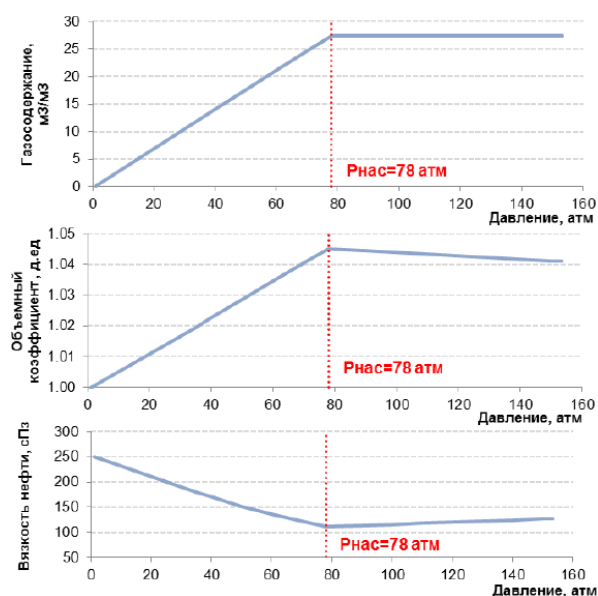
Параметр/Parameter	Значение Value
Давление насыщения, атм/Bubble point pressure, atm	78
Динамическая вязкость пластовой нефти, сПз Dynamic viscosity, cP	111
Газосодержание, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> /Gas-oil ratio, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	27,4
Объемный коэффициент нефти, д. ед. Formation volume factor, dimensionless	1,045
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup> /Oil density, kg/m <sup>3</sup>	945
Пластовая температура/Reservoir temperature, °C	16

Для получения обобщенной кривой относительных фазовых проницаемостей (ОФП) в системе «нефть–вода» проводилась следующая процедура:

1. Полученные в результате лабораторных экспериментов кривые масштабировались от 0 до 1.
2. Масштабированные кривые осреднялись посредством подбора корреляции Corey путем минимизации среднеквадратичной ошибки.
3. Полученные корреляционные кривые масштабировались на средние значения конечных точек исходных лабораторных кривых, полученные результаты показаны на рис. 8.

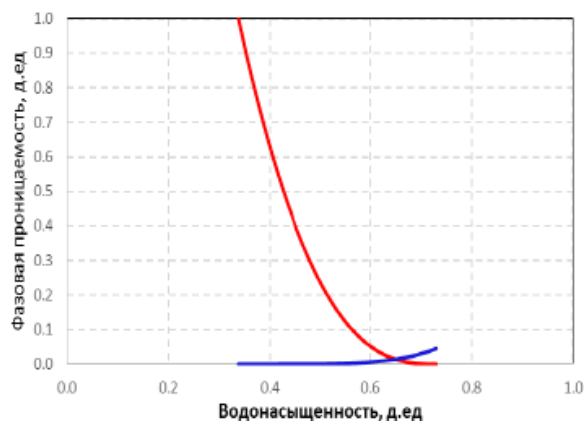
По результату исследования значение ОФП воды при остаточной нефтенасыщенности составляет

0,045, что является крайне низким. Для уточнения был изучен мировой опыт определения ОФП на месторождениях-аналогах. Неопределенность в нахождении ОФП в слабоконсолидированных коллекторах с вязкой нефтью является очень распространенной проблемой [12, 13]. В работе [14] был произведен бенчмаркинг 54 месторождений. Из данного анализа видно, что значения ОФП воды при остаточной нефтенасыщенности изменяются в диапазоне 0,05–0,3 со занчением P50 0,13.



**Рис. 7.** Основные свойства нефти

**Fig. 7.** Main oil properties



**Рис. 8.** Относительные фазовые проницаемости в системе «нефть–вода»

**Fig. 8.** Oil-water relative permeabilities

Исходя из анализа мирового опыта, на начальном этапе разработки было понимание о диапазоне возможных значений ОФП воды при остаточной нефтенасыщенности и важности данного параметра. Ввиду отсутствия истории добычи было выбрано верхнее значение, равное 0,3. По мере накопления истории разработки и адаптации модели данное значение было скорректировано до 0,15, и есть понимание, что это не окончательное значение. Таким образом, величина соотношения подвижностей  $M$ , рассчитанного по

концевым точкам ОФП, составляет от 5 до 30 и оказывает существенное влияние на эффективность разработки пласта ПК1-3.

#### Относительные фазовые проницаемости в системе «нефть–газ»

По месторождениям-аналогам высоковязкой нефти (Канада и США) в среднем при достижении газонасыщенности 33 % эффективного порового пространства подвижность по нефти становится нулевой. Учитывая остаточную водонасыщенность по пласту ПК1-3, которая составляет 37 %, значение остаточной нефтенасыщенности (SOGCR) при вытеснении газом составит 30 %. Значение ОФП по газу при остаточной нефтенасыщенности также принято согласно мировому опыту и составляет 0,4 (рис. 9).



Рис. 9. Относительные фазовые проницаемости в системе «нефть–газ»

Fig. 9. Oil-gas relative permeabilities

#### Остаточная водонасыщенность

На основании имеющихся данных по капиллярно-метрическим исследованиям образцов керна построена зависимость остаточной водонасыщенности от керновой пористости (рис. 10).

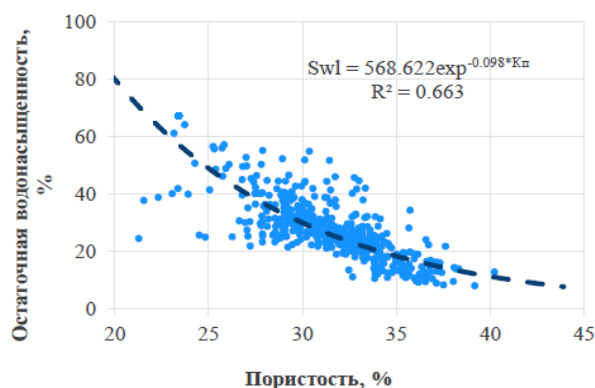


Рис. 10. Зависимость остаточной водонасыщенности от пористости

Fig. 10. Relation between residual water saturation and porosity

#### Критическая газонасыщенность

На следующем этапе актуализировалась на новые данные зависимость для критической водонасыщенности (SWCR). Были проанализированы зависимости

SWCR от пористости, абсолютной проницаемости и остаточной водонасыщенности. Наибольшую сходимость показала линейная зависимость критической водонасыщенности от остаточной, которая была выбрана для дальнейшего использования (рис. 11).

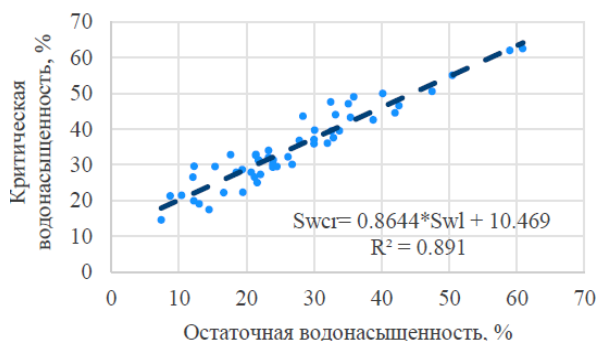


Рис. 11. Зависимость критической водонасыщенности от остаточной

Fig. 11. Relation between residual and critical water saturation

#### Остаточная нефтенасыщенность при вытеснении нефти водой

При анализе данных учитывались результаты экспериментов как по определению ОФП, так и по определению остаточной нефтенасыщенности и коэффициента вытеснения нефти водой. На рис. 12 отражено сопоставление замеров остаточной нефтенасыщенности при вытеснении нефти водой от пористости.

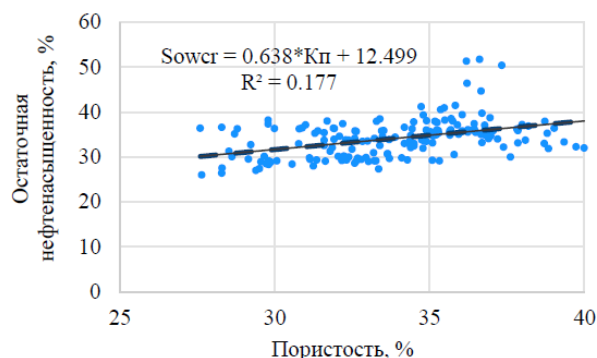


Рис. 12. Зависимость остаточной нефтенасыщенности от пористости

Fig. 12. Relation between residual oil saturation and porosity

В связи с тем, что ярко выраженной корреляции SOWCR от ФЕС не наблюдается, принято среднее значение остаточной нефтенасыщенности с учетом поведения тренда по результатам исследований керна. При средней пористости пласта ПК1-3 SOWCR составляет 31 %.

#### Критическая газонасыщенность

Проведен ряд экспериментов по определению критической газонасыщенности (SGCR), при этом стоит отметить, что существующие методики измерения не позволяют корректно определить точку начала движения газа при значениях газонасыщенности. Но если провести экстраполяцию данных на примере одной из скважин, получаем нулевое значение SGCR. В усло-



виях большой разности вязкостей (нефть – 111 сП, газ – 0,013 сПз) возникает большая разность подвижностей фаз.

Поэтому справедливо полагать, что для растворенного газа, выделившегося из нефти, действует правило гистерезиса ОФП по Коутсу [15]. В данной модели описан гистерезис кривых в системе «нефть–газ» при присутствии критической воды и критической нефти. В системе «нефть–газ» нефть является смачивающим флюидом, газ не смачивающим. Так, при снижении пластового давления происходит появление первых пузырьков газа. Дальнейшее изменение кривой ОФП по газу проходит по так называемой кривой вытеснения. Данная кривая справедлива для того случая, когда вытеснение происходит полностью, до получения критического значения насыщенности по нефти (точка  $K_{rg0}$ ). Обратный процесс, так называемая капиллярная пропитка, пойдет по кривой 2 и дойдет до значения критической газонасыщенности. Далее при обратном вытеснении возникает новая критическая газонасыщенность ( $S_{gs}^*$ ), которая значительно ниже значения при полном вытеснении ( $S_{gs}$ ).

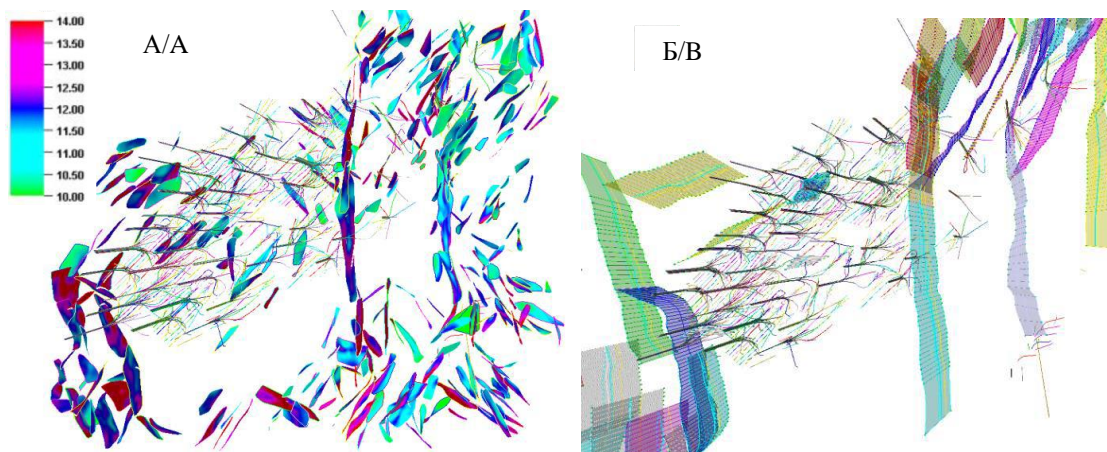
В соответствии с этим критическая газонасыщенность была посчитана по кривой вытеснения. По расчетам получено околонулевое значение критической

газонасыщенности в нефтяной оторочке. Таким образом, в нефтяной оторочке значение SGCR принято равным 0.

#### Исследование геомеханических свойств пласта ПК1-3

Для интерпретации ослабленных плоскостей пласта ПК1-3 (поверхности, вдоль которых действует наибольшее отношение касательного к нормальному напряжению, практически отсутствует когезия и низкий коэффициент угла внутреннего трения, данные поверхности также характеризуются аномалией по сейсмическим атрибутам) использовалась технология Ant Tracking.

На рис. 13, А показана результирующая карта разрывных нарушений, построенная по данным атрибута Ant Tracking, на рис. 13, Б – карта разрывных нарушений по концептуальной геологической модели [16]. Можно отметить, что дислокации по второй карте прослеживаются с высокой точностью на первой карте, но также наблюдается и обратная связь. Ряд разрывов закартированы только при первом подходе к интерпретации. Анализируя возможный структурный парагенез, однозначно можно сказать, что на Восточно-Мессояхском месторождении сочетаются зоны сжатия, сдвига и растяжения.



**Рис. 13.** Структурные формы – дислокации, выделенные по атрибуту Ant Tracking (А) и разрывные нарушения из концептуальной геологической модели (Б)

**Fig. 13.** Structural forms allocated by Ant Tracking attribute (А) and discontinuities from the conceptual geological model (Б)

При сравнении полученных результатов с типовыми парагенезами тектонических нарушений по Л.М. Расцветаеву можно сделать вывод, что «елочка» (номер VII) и карта, построенная на основе первого подхода, в целом лучше всего описывают тектоническую обстановку региона и структурный парагенез.

Формирование разрывов сплошности в горной породе может быть связано с двумя процессами: формированием пликативной структуры и дизъюнктивного разрывного нарушения. На палетке типовых парагенезов тектонических нарушений по Л.М. Расцветаеву представлены те парагенезы, которые связаны с хрупким разрушением пород. Складкообразование же является следствием пластического деформирования горных пород, их «течения» в геологическом масштабе. Во время складкообразования также происходит

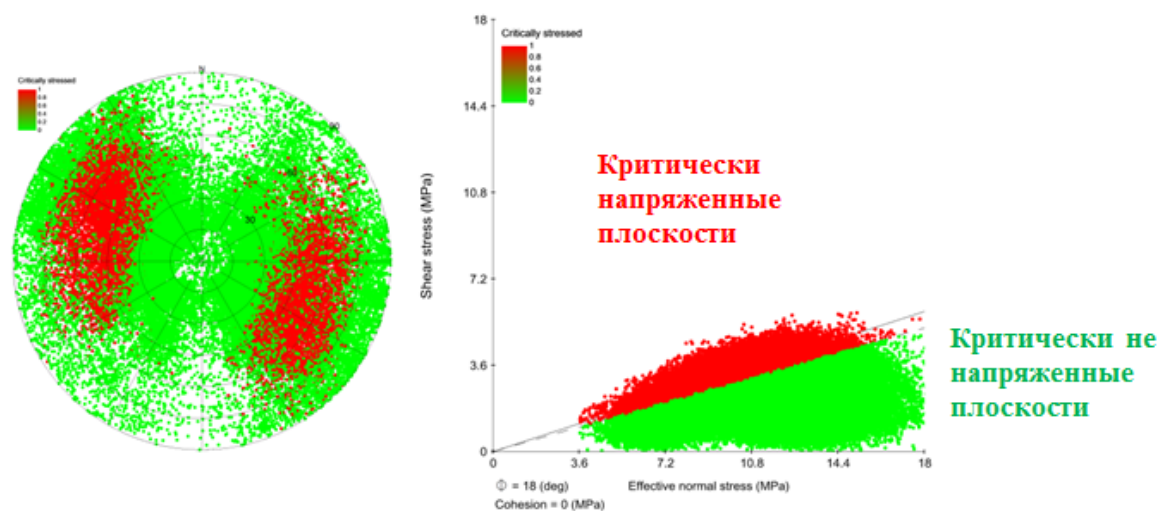
хрупкое разрушение, но в более мелком масштабе разрывы возникают в тех местах, где действующие напряжения превышают предел прочности породы, силы внутреннего трения и сцепления. Традиционно формирование крупного разрыва сопряжено с образованием множества микроразрывов по будущей поверхности разрушения – скольжения. Модель образования складки поперечного изгиба, вероятно, соответствует положительной структуре Восточно-Мессояхского месторождения [17].

Во время образования положительной структуры (складкообразования) формировались разрывы, сонаправленные со складками, образование которых связано с действием растягивающего напряжения в ортогональном направлении. На крыльях наблюдаются разрывы, которые возникли за счет действия сдвиго-

вых напряжений, плоскости ориентированы под углом к изолиниям структурной карты, локализованы в основном в южном крыле.

После складкообразования начали действовать «деструктивные» тектонические силы, которые привели к хрупкому разрушению пород. В ходе этого этапа сформировались основные разрывные нарушения, включая зону грабена, которая сопряжена двумя сдвиго-сбросами. Как было указано ранее, на данном месторождении по морфологии разрывных нарушений и информации по структурной карте (перемещения) сделан вывод о том, что в бассейне действовал структурный парагенез типа «елка» по Л.М. Расцветаеву с формированием трех зон: сжатия, растяжения и сдвига.

Далее по выявленным ослабленным плоскостям (разрывам и литологическим границам) был проведен расчет критически напряженного состояния на основе трехмерной геомеханической модели [18]. В результате данного расчета разрывы разделены на два типа: критически напряженные – активные, и критически не напряженные – пассивные (рис. 14). Активные дислокации интересны с точки зрения бурения (в данных областях могут наблюдаться поглощения) и большой вынос твердых частиц. Для проведения такого расчета используется линейный критерий разрушения Мора Кулона с допущением: когезия по разрыву = 0 МПа, коэффициент угла внутреннего трения 21 градус.



**Рис. 14.** Диаграммы критически напряженного состояния естественных ослабленных плоскостей. Красные – критически напряженные плоскости, зеленые – не критически напряженные

**Fig. 14.** Charts of the critical state of natural weakened planes. Red is critical, green is not critical

Можно отметить, что 25–30 % из всех участков плоскостей (плоскости отражены точками с определенном шагом дискретизации) являются «активными», бурение через активные плоскости увеличивает риск осложнений при бурении скважин и накладывает определенные риски при разработке.

#### Анализ работы аквифера и оценка его влияния на режим разработки

Еще одной особенностью пласта ПК1-3 является наличие подстилающего водоносного горизонта (аквифера), имеющего гидродинамическую связь различной степени с циклитом «С».

Для оценки параметров аквифера была использована концепция материального баланса [19]. Для описания аквифера была использована аналитическая модель аквифера Фетковича, позволяющая оценить приток из аквифера, его размер и продуктивность, основываясь на фактических объемах добычи/закачки путем адаптации пластового давления. Помимо этого, был рассчитан вклад каждого режима разработки, также с применением материального баланса, полученные результаты по блокам с заводнением показаны на рис. 15 [3].

На различных участках параметры аквифера существенно различаются и он оказывает различный вклад в режим разработки. Продуктивность аквифера изменяется от 20 до 1250 м<sup>3</sup>/сут/атм, вклад аквифера в компенсацию составляет от 18–67 %. Тем не менее даже в участках с самым продуктивным и активным аквифером, несмотря на присутствие режима растворенного газа, пластовое давление интенсивно снижается, что говорит о необходимости своевременного применения вторичных методов разработки для поддержания пластового давления.

Также необходимо понимать, что энергия аквифера ограничена и важно не допускать снижения пластового давления в аквифере путем своевременной организации закачки/ограничений отборов, что особенно важно для месторождений вязкой нефти [20]. По факту имеющейся истории разработки пласта ПК1-3 даже участки с очень высокопродуктивным аквифером подвержены снижению пластового давления, особенно при хорошей гидродинамической связи и наличии конусов. Это говорит о необходимости своевременной организации системы поддержания пластового давления с правильно выбранным агентом вытеснения, учитывающим все описанные выше особенности пласта ПК 1-3.

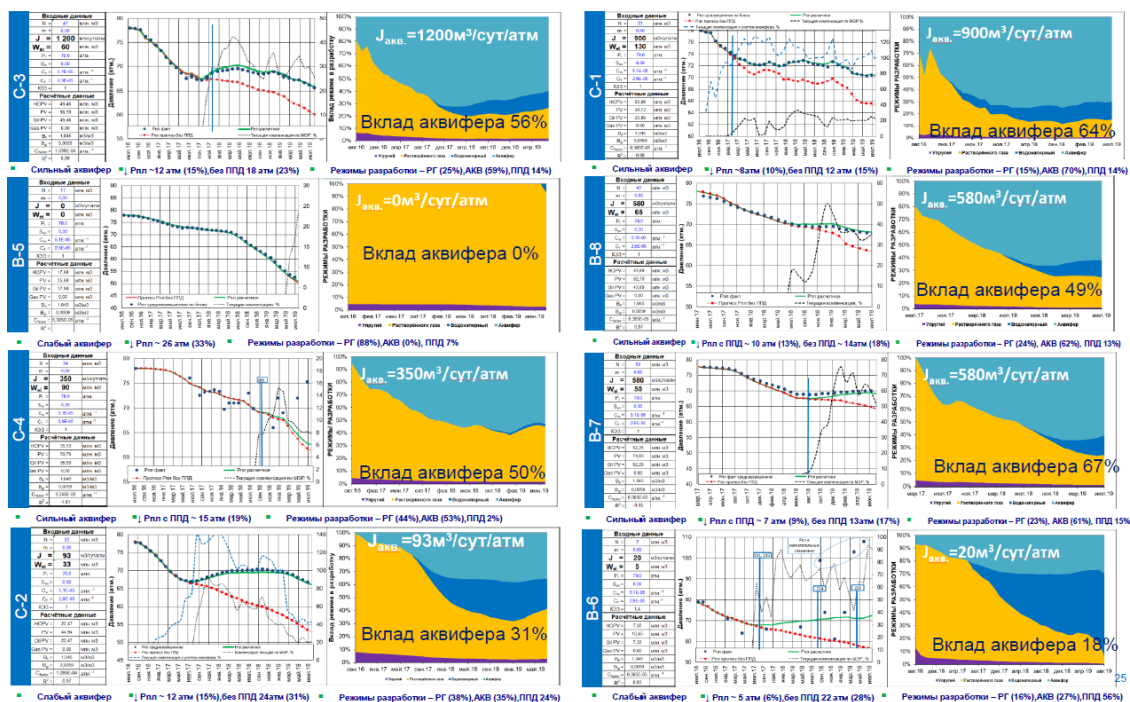


Рис. 15. Результаты оценки параметров аквифера и режимов разработки по блокам  
Fig. 15. Results of estimation of the aquifer parameters and block drive indexes calculation

### Заключение

Исследование ключевых геологофизических характеристик слабоконсолидированного коллектора вязкой нефти ПК 1-3 и его флюидов позволило выделить основные особенности, важные для его эффективной разработки:

- континентальные отложения с преобладанием русловых и пойменных фаций;
- слабоконсолидированный коллектор;
- высокая неоднородность и расчленённость коллектора;
- наличие пропластков с различной степенью гидродинамической связанности;
- высоковязкая нефть и неблагоприятное соотношение подвижностей;
- высокое содержание глинистой составляющей;
- низкая пластовая температура;
- наличие геомеханических эффектов и ослабленных естественных плоскостей;

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обновление концептуальной геологической модели пласта ПК1-3 Восточно-Мессояхского месторождения: отчет о НИР / Б.В. Белозеров, Б.В. Буторин, Д.А. Решетников, А.О. Вайсман, Р.З. Фаизов, Н.А. Парфенов. – Тюмень: ООО «Газпромнефть НТЦ», 2016 г. – 164 с.
2. Зундэ Д.А., Попов И.П. Методика построения сиквенс-стратиграфической модели покурской свиты // Нефтепромысловое дело. – 2015. – № 5. – С. 54–59.
3. Заводнение Восточно-Мессояхского месторождения с высоковязкой нефтью в слабоконсолидированном коллекторе – вызовы и продуктивность / И.Р. Ильясов, А.А. Подкорытов, А.А. Гудз, В.С. Комаров, Н.А. Глушенко // SPE-196752-RU. – 2019. – С. 5–10. URL: <https://doi.org/10.2118/196752-RU> (дата обращения 04.08.2020).
4. Барабошкин Е.Ю. Практическая седиментология. Терригенные резервуары: пособие по работе с керном. – Тверь: ГЕРС, 2011. – 152 с.

- наличие растворенного газа и аквифера с различной продуктивностью;
- интенсивное снижение пластового давления, невозможность разработки на истощении.

Таким образом, очевидна необходимость применения вторичных методов разработки и системы поддержания пластового давления. Однако ввиду описанных выше особенностей заводнение пласта ПК 1-3 сопряжено с высокими рисками прорывов воды и низким коэффициентом охвата пласта заводнением, что будет оказывать большое влияние на эффективность разработки пласта ПК 1-3 и конечный коэффициент извлечения нефти. Поэтому исследование возможности применения альтернативных технологий и агентов заводнения слабоконсолидированных коллекторов вязкой нефти, в том числе с применением физико-химических методов увлечения нефтеотдачи с системным подходом, является актуальной и интересной задачей.

5. Филиппович Ю.В., Захарова О.А., Чухланцева Е.Р. Литолого-фациальный анализ по основным резервуарам юры и мела Восточно-Мессояхского и Западно-Мессояхского месторождений: отчет о НИР. – СПб.: ООО «Газпром нефть НТЦ», 2011. – 172 с.
6. Einsele G. Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget. – Berlin; Heidelberg: Springer, 1992. – 628 p.
7. Selley R. Applied sedimentology. 2nd ed. – London: Academic Press, 2000. – 523 p.
8. Sedimentary facies computation and stratigraphic analyses using well logs, borehole images and cores in triassic fluvial sandstones of the Algerian Sahara / T. Ogunyemi, P. Montaggioni, I. Boubakeur, M. Junguito, M. Batrina // SPE-121945-MS. – 2009. – С. 4–11. URL: <https://doi.org/10.2118/121945-MS> (дата обращения 04.08.2020).
9. Особенности геологического строения и нефтегазоносность Среднемессояхского вала / С.Е. Агалаков, А.Н. Бабурин,

- С.Н. Беспалова, В.С. Бочкарев, И.О. Коровина // Горные ведомости. Тюмень. – 2004. – № 1. – С. 48–72.
10. Нейман В.Б. Теория и методика палеотектонического анализа. – М.: Недра, 1974. – 79 с.
  11. Statistics for petroleum engineers and geoscientists / J.L. Jensen, L.W. Lake, P.W.M. Corbett, D.J. Goggin. – New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997. – 390 p.
  12. Wang J., Dong M., Ashghari K. Effect of oil viscosity on heavy oil-water relative permeability curves // SPE-99763-MS. – 2006. – С. 3–8. URL: <https://doi.org/10.2118/99763-MS> (дата обращения 04.08.2020).
  13. Elhaj M., Hashan M., Hossain M. A critical review and future trend on relative permeability hysteresis // SPE-191260-MS. – 2018. – С. 5–8. URL: <https://doi.org/10.2118/191260-MS> (дата обращения 04.08.2020).
  14. Berg E.A., Bjarlykke O.P. Heavy oil and relative permeability in laboratory, simulations and production. Is there a link? // SPE-172856-MS. – 2014. – С. 2–4. URL: <https://doi.org/10.2118/172856-MS> (дата обращения 04.08.2020).
  15. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем / пер. с англ. 2-е изд., стер. – М.: Институт компьютерных исследований, 2004. – 407 с.
  16. Лукин С.В., Жигульский С.В., Шаповалова А.А. Отчет по геолого-геомеханическому моделированию: отчет НИР. – СПб.: ООО «Газпром нефть НТЦ», 2018. – 71 с.
  17. Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. – М.: АН СССР, 1959. – 255 с.
  18. Zoback M.D. Reservoir geomechanics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 500 p.
  19. Ahmed T. Reservoir engineering handbook third edition. – Burlington: Gulf professional publishing, 2005. – 1377 p.
  20. Successful strategy for waterflooding project implementation in an extra heavy oil field / L. Nino, F. Bonilla, L. Gil, W. Henaio, J. Reina, E. Jimenez, P. Vivas // SPE-198924-MS. – 2020. – С. 5–9. URL: <https://doi.org/10.2118/198924-MS> (дата обращения 04.08.2020).

Поступила: 09.07.2020 г.

#### Информация об авторах

**Ильясов И.Р.**, кандидат технических наук, заместитель начальника управления разработки месторождений нефти и газа, Акционерное общество «Мессояханефтегаз».

**Грачев С.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Тюменского индустриального университета.

UDC 622.276

## GEOLOGICAL AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE FIELD DEVELOPMENT OF UNCONSOLIDATED VISCOUS OIL RESERVOIRS

Ilnur R. Ilyasov<sup>1</sup>,  
ilnur\_ilyasov@mail.ru

Sergey I. Grachev<sup>2</sup>,  
grachevsi@tyuiu.ru

<sup>1</sup> Joint Stock Company «Messoyakhneftegaz»,  
8B, 50 let Oktyabrya street, Tyumen, 625048, Russia.

<sup>2</sup> Tyumen Industrial University,  
70, Melnikaite street, Tyumen, 625000, Russia.

**The relevance.** The East-Messoyakhskoe field is unique not only in terms of geological reserves, but also in its geological characteristics. Main reservoir PK 1-3 contains about 65 % of the reserves and is an unconsolidated reservoir with a high-viscosity oil. There is practically no experience in development of similar oil fields in the Arctic conditions. The study of geological and physical characteristics of unconsolidated reservoirs with viscous oil is a relevant objective.

**The main aim** of the research is to analyze and identify the key geological and physical characteristics of the field development of unconsolidated viscous oil reservoirs in order to find methods and technologies for improving field development efficiency.

**Objects** of the research are unconsolidated viscous oil reservoir under development of the East- East-Messoyakhskoe field.

**Methods:** critical analysis, content analysis, analysis and generalization of existing experience in the development of unconsolidated viscous oil reservoirs on the example of the PK 1-3 reservoir of the East-Messoyakhskoe field.

**Results.** The authors have carried out the critical analysis of the key geological and physical characteristics of the PK 1-3 reservoir and its fluids research, which must be taken into account in order to develop it with maximum efficiency. The list of key characteristics was made. Their impact on the field development efficiency was shown. The analysis of waterflooding experience and aquifer impact reservoir development was performed. The need for the use of secondary development methods for PK 1-3 reservoir and reservoir pressure maintaining system was proved. However, due to the characteristics described above, the traditional waterflooding of unconsolidated viscous oil reservoirs carries with it high risks of early water breakthrough and poor sweep efficiency, which will have a great impact on the field development efficiency and the final oil recovery factor. It was concluded about the requirement of alternative technologies and flooding agents research, including the application of physico-chemical enhanced oil recovery methods with a systemic approach, which is a relevant and interesting task.

### Key words:

Unconsolidated reservoir, viscous oil, flooding, geological and physical characteristics, field development.

### REFERENCES

1. Belozherov B.V., Butorin B.V., Reshetnikov D.A., Vaisman A.O., Faysov R.Z., Parfenov N.A. *Obnovlenie kontseptualnoy geologicheskoy modeli plasta PK1-3 Vostochno-Messoyakhskogo mestorozhdeniya: otchet o NIR* [Update of the conceptual geological model of the PK1-3 formation of the East-Messoyakhskoe field: Research report]. Tyumen, Gazpromneft science and technology center, 2016. 164 p.
2. Zundae D.A., Popov I.P. Methodology for the construction of the sequence-stratigraphic model of the Pocer suite. *Oilfield engineering*, 2015, no. 5, pp. 54–59. In Rus.
3. Ilyasov I., Podkorytov A., Gudz A., Komarov V., Glushchenko N. Waterflooding East-Messoyakhskoe heavy oil field in unconsolidated reservoir – challenges and proactivity. *SPE-196752-MS*, 2019, pp. 5–10. In Rus. available at: <https://doi.org/10.2118/196752-MS> (accessed 4 August 2020).
4. Baraboshkin E.Y. *Prakticheskaya sedimentologiya. Terrigennyye rezervuary: posobie po rabote s kernom* [Practical sedimentology. Clastic reservoirs: core manual]. Tver, GERS Publ., 2011. 152 p.
5. Filippovich Yu.V. *Litologo-fatsialny analiz po osnovnym rezervuaram Yury i Mela Vostochno-Messoyakhskogo i Zapadno-Messoyakhskogo mestorozhdeniy: otchet o NIR* [Litologo-factorial analysis of the main reservoirs of the Jurassic and Cretaceous period of the East- Messoyakhskoe field and West- Messoyakhskoe fields deposits: Research report]. Saint Petersburg, Gazpromneft science and technology center, 2011. 172 p.
6. Einsele G. *Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1992. 628 p.
7. Selley R. *Applied sedimentology*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Academic Press, 2000. 523 p.
8. Ogunyemi T., Montaggioni P., Boubakeur I., Junguito M., Batrina M. Sedimentary facies computation and stratigraphic analyses using well logs, borehole images and cores in triassic fluvial sandstones of the Algerian Sahara. *SPE-121945-MS*, 2009, pp. 4–11. Available at: <https://doi.org/10.2118/121945-MS> (accessed 4 August 2020).
9. Agalakov S.E., Baburin A.N., Bepalova S.N., Bochkarev B.C., Korovina I.O. The geological structure and oil bearing features of the Middle Messoyakha shaft. *Gornye vedomosti*, 2004, no. 1, pp. 48–72. In Rus.
10. Neiman V.B. *Teoriya i metodika paleotektonicheskogo analiza* [Theory and methodology of paleotectonic analysis]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 79 p.
11. Jensen J.L., Lake L.W., Corbett P.W.M., Goggin, D.J. *Statistics for petroleum engineers and geoscientists*. New Jersey, Prentice Hall PTR, 1997. 390 p.
12. Wang J., Dong M., Ashghari K. Effect of oil viscosity on heavy oil-water relative permeability curves. *SPE-99763-MS*, 2006, pp. 3–8. Available at: <https://doi.org/10.2118/99763-MS> (accessed 4 August 2020).
13. Elhaj M., Hashan M., Hossain M. A critical review and future trend on relative permeability hysteresis. *SPE-191260-MS*, 2018, pp. 5–8. Available at: <https://doi.org/10.2118/191260-MS> (accessed 4 August 2020).
14. Berg E.A., Bjorlykke O.P., Heavy oil and relative permeability in laboratory, simulations and production. Is there a link?. *SPE-172856-MS*, 2014, pp. 2–4. Available at: <https://doi.org/10.2118/172856-MS> (accessed 4 August 2020).
15. Aziz X., Settari E. *Matematicheskoe modelirovanie plastovyykh sistem* [Mathematical modeling of reservoir systems]. Translated

- from English. Moscow, Institute of computer research Publ., 2004. 407 p.
16. Lukin S.V. *Otchet po geologo-geomekhanicheskomu modelirovaniyu: otchet NIR* [Geology and geomechanics simulation: Research report]. Saint Petersburg, Gazpromneft science and technology center, 2018. 71 p.
  17. Gzovskii M.V. *Osnovnye voprosy tektonofiziki i tektonika Baydzhansayskogo antiklinoriya* [The main tectonophysics and tectonics questions of Baydzhansaysky anticlinorium]. Moscow, AS USSR, 1959. 255 p.
  18. Zoback M.D. *Reservoir geomechanics*. Cambridge, Cambridge University Press, 2007. 500 p.
  19. Ahmed T. *Reservoir engineering handbook*. 3<sup>rd</sup> ed. Burlington, Gulf professional publishing, 2005. 1377 p.
  20. Nino L., Bonilla F., Gil L., Henao W., Reina J., Jimenez E., Vivas P. Successful strategy for waterflooding project implementation in an extra heavy oil field. *SPE-198924-MS*, 2020, pp. 5–9. Available at: <https://doi.org/10.2118/198924-MS> (accessed 4 August 2020).

*Received: 9 July 2020.*

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

**Ilnur R. Ilyasov**, Cand. Sc., deputy director, Joint Stock Company «Messoyakhaneftegaz».

**Sergey I. Grachev**, Dr. Sc., professor, head of the department, Tyumen Industrial University.

УДК 621.31, 622.276.054

## ОЦЕНКА СОВОКУПНОЙ СТОИМОСТИ ВЛАДЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С ВНУТРИСКВАЖИННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ

Копырин Владимир Анатольевич<sup>1</sup>,  
kopyrinva@gmail.com

Хамитов Рустам Нуриманович<sup>2,1</sup>,  
apple\_27@mail.ru

Глазырин Александр Савельевич<sup>3,4</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич<sup>3</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Раков Иван Витальевич<sup>5</sup>,  
rakovivan@live.com

Портнягин Алексей Леонидович<sup>1</sup>,  
pal1979@mail.ru

Маркова Анастасия Алексеевна<sup>1</sup>,  
aamarkova72@gmail.com

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>4</sup> Институт нефти и газа Югорского государственного университета,  
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

<sup>5</sup> ООО Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания»,  
Россия, 634040, г. Томск, ул. Высоцкого, 33.

**Актуальность.** На сегодняшний день добыча нефти, как правило, осуществляется механизированным способом, который является достаточно энергоемким. В структуре себестоимости добычи нефти на стоимость электроэнергии приходится от 30 до 35 % затрат. Если учесть, что добыча нефти погружными установками не обходится без потерь мощности, которые составляют от 20 до 40 % от потребляемой электроэнергии, то технологии повышения энергоэффективности добычи обладают большим потенциалом внедрения. Одним из перспективных направлений уменьшения потребления электроэнергии погружными установками является технология внутрискважинной компенсации реактивной мощности. С одной стороны, внедрение внутрискважинных компенсаторов приводит к увеличению затрат на закупку, обслуживание, мобилизацию или прокат погружной установки. С другой стороны, использование внутрискважинных компенсаторов приводит к снижению затрат на электроэнергию и повышению эффективности производства. Применение внутрискважинных компенсаторов позволяет уменьшить потери активной мощности в системе передачи электроэнергии погружной установки за счет снижения реактивной составляющей тока погружного электродвигателя. Тем не менее, при разных технических характеристиках оборудования погружной установки эффект от применения внутрискважинного компенсатора будет отличаться. В связи с этим, следует исключить ситуации, когда затраты на внедрение внутрискважинных компенсаторов будут выше положительного эффекта от внедрения. Возникает необходимость определения совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности.

**Цель:** провести анализ снижения текущих затрат на электроэнергию при использовании установок электроцентробежных насосов с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности.

**Объект:** участок системы электроснабжения куста нефтедобывающих скважин, оснащенных установками электроцентробежного насоса.

**Методы:** законы теоретических основ электротехники, теории электропривода, методы имитационного моделирования и технико-экономического обоснования. Имитационное моделирование участка системы электроснабжения куста скважин выполнено в программном комплексе MatLab Simulink.

**Результаты.** Описана методика расчета совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором. Имитационная модель участка системы электроснабжения куста скважин построена в программном комплексе MatLab Simulink. Установлено, что использование внутрискважинных компенсаторов приводит к снижению затрат на электроэнергию при владении погружной установкой. Максимальное снижение затрат на электроэнергию на одной из исследуемых погружных установок составило 303,6 тыс. р. в год.

### Ключевые слова:

Погружной электроцентробежный насос, совокупная стоимость владения, электроэнергия, внутрискважинный компенсатор, имитационная модель, погружной электродвигатель.

### Введение

В настоящее время нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность является одним из

центров по внедрению инновационного оборудования, к которому относятся внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности (ВКРМ). Тем не менее

использование нового оборудования, а также усовершенствование существующего технологического процесса не обходится без изменения схемы электропитания объекта. В свою очередь, изменение схемы электропитания может привести к перераспределению потерь мощности в питающих линиях. Согласно ГОСТ 32144-2013 основными показателями качества электрической энергии являются: отклонение частоты; медленные изменения напряжения; колебания напряжения и фликер; несинусоидальность напряжения; несимметрия напряжений в трехфазных системах; прерывание напряжения; провалы напряжения и перенапряжения и другие факторы [1–3].

Одним из основных факторов наряду с потребляемой активной мощностью и напряжением потребителя электрической энергии является его коэффициент мощности, характеризующий эффективность передачи и потребления электрической энергии [4]. В связи с этим определение оптимальной мощности устройств компенсации реактивной мощности в сопоставлении с их стоимостью, транспортировкой, затратами на обслуживание и положительным эффектом от их применения является важной задачей [5–8].

На сегодняшний день основными потребителями реактивной мощности на нефтедобывающих объектах, использующих механизированный способ добычи, являются асинхронные электродвигатели приводов штанговых, плунжерных, лопастных, винтовых, центробежных и других типов насосов. Известно, что коэффициент мощности данного типа электродвигателей находится в пределах от 0,8 до 0,85 о.е. в номинальном режиме эксплуатации [9–12].

Если коэффициент мощности потребителя электрической энергии (в нашем случае асинхронного электродвигателя) принять равным 0,8 от полной мощности, то доля потребляемой реактивной мощности составит 0,6 от полной мощности, которую необходимо передать от источника питания (автономного или централизованного) до потребителя. Генерация реактивной мощности на электростанциях дешевле, чем ее выработка с помощью компенсирующих устройств непосредственно в узлах нагрузки [6]. Тем не менее из-за удаленности нефтяных месторождений стоимость ее передачи от электростанции до потребителей может в несколько раз превышать затраты на установку компенсирующих устройств. Кроме того, в большинстве случаев технически невозможно передать реактивную мощность от электростанции до потребителей из-за недопустимого снижения напряжения в электрической сети.

Исследованием проблемы повышения коэффициента мощности систем электропитания нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих объектов занимались многие ученые и промышленные работники, среди которых: Б.Н. Абрамович, В.А. Веников, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, Р.С. Камалетдинов, И.Н. Ковалев, А.В. Кузнецов, А.Б. Лоскутов, В.Г. Пекелис, Б.С. Рогальский и многие другие. Однако, несмотря на актуальность проблемы повышения коэффициента мощности нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих объектов, она решается медленно, в связи с

внедрением новых специфических электроприемников с нестандартными электрическими параметрами.

По способу подключения компенсирующих устройств выделяют индивидуальную [9, 13], групповую [14–16] и централизованную компенсацию [17, 18]. На нефтедобывающих месторождениях, как правило, применяется групповая компенсация реактивной мощности. При данном типе компенсации компенсирующее устройство (КУ) подключается к шине комплектной трансформаторной подстанции. Мощность КУ выбирается исходя из мощности группы электроприемников, их группового и требуемого коэффициента мощности. Использование данного способа компенсации реактивной мощности позволяет уменьшить потери в линиях электропередачи от ответственной электрической подстанции до комплектно-трансформаторной подстанции, расположенной на кусте нефтяных скважин. Однако участок электрической сети от комплектной трансформаторной подстанции до потребителя остается «загруженным» реактивными токами, что приводит к дополнительным потерям мощности в кабельных линиях.

В работах [9, 11, 19] для увеличения передаваемой мощности и снижения потерь в достаточно протяженных кабельных линиях, питающих погружное технологическое оборудование, предлагается использовать индуктивные или емкостные индивидуальные компенсирующие устройства. Индуктивные КУ могут быть выполнены в виде резонансных фильтров, настроенных на основную гармонику и предназначенных для эксплуатации в погружных установках с повышенной частотой напряжения питания [19]. Емкостные КУ, или внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности, конструктивно представляют собой герметичный корпус, внутри которого установлены батареи конденсаторов и устройства защиты. ВКРМ предназначены для компенсации индуктивной составляющей тока погружного электродвигателя. Предложенные авторами методики позволяют определить оптимальные параметры компенсирующего устройства с учетом технических характеристик погружного оборудования, длины и сечения кабельной линии, нормативного коэффициента эффективности капиталовложений и амортизации оборудования [20]. Согласно исследованиям, положительный экономический эффект от внедрения ВКРМ достигается в погружных установках, оснащенных электродвигателями свыше 90 кВт и кабельной линии длиной более 1500 м. Срок окупаемости внутрискважинных компенсаторов варьируется от 6 до 12 месяцев, в зависимости от технических характеристик погружной установки.

Тем не менее вопрос об определении совокупной стоимости владения погружными установками, оснащенными внутрискважинными компенсаторами, остается открытым, что определяет актуальность данного исследования.

#### Теория

На сегодняшний день владение погружным оборудованием для добычи нефти, как правило, осуществляется двумя способами:



- приобретение нефтяной компанией и обслужива- ние сервисным подразделением;
- обслуживание по схеме «сутко-прокат».

В первом случае нефтяная компания приобретает погружную установку. Во втором случае оборудова- ние принадлежит сервисной компании и передается во временное владение и пользование нефтяной ком- пании.

Рассмотрим установку электроцентробежного насоса (УЭЦН) с внутрискважинным компенсатором. Величина совокупной стоимости владения УЭЦН, приобретенной предприятием и обслуживаемой сер- висным подразделением, складывается из затрат на закупку оборудования, обслуживание, мобилизацию и проведение спускоподъемных операций, вызванных отказами оборудования. Также в совокупную стои- мость владения УЭЦН входят затраты на электро- энергию, потребляемую оборудованием. Совокупная стоимость владения УЭЦН за расчетный период в первом случае определяется следующим образом [21]:

$$ССВ_3 = Z_{\text{закуп}} + Z_{\text{обсл}} + Z_{\text{моб}} + Z_{\text{э/э}} + Z_{\text{СПО}}, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{закуп}}$  – стоимость оборудования, тыс. р.;  $Z_{\text{обсл}}$  – за- траты на обслуживание оборудования, тыс. р.;  $Z_{\text{моб}}$  – затраты на мобилизацию оборудования, тыс. р.;  $Z_{\text{э/э}}$  – затраты на электроэнергию, тыс. р.;  $Z_{\text{СПО}}$  – затраты на спускоподъемные операции, тыс. р.

Во втором случае вместо затрат на закупку и об- служивание оборудования учитываются затраты на его прокат:

$$ССВ_п = Z_{\text{прокат}} + Z_{\text{моб}} + Z_{\text{э/э}} + Z_{\text{СПО}}, \quad (2)$$

где  $Z_{\text{прокат}}$  – затраты на прокат оборудования, тыс. р.

Затраты на закупку оборудования, определяются по выражению:

$$Z_{\text{закуп}} = (Z_{\text{УЭЦН}} \cdot N_a + Z_{\text{СУ}} \cdot N_a) \cdot t_p,$$

где  $Z_{\text{УЭЦН}}$ ,  $Z_{\text{СУ}}$  – стоимость комплекта УЭЦН и стан- ции управления соответственно, тыс. р.;  $N_a$ ,  $N_a$  – норма амортизации УЭЦН и станции управления со- ответственно, год<sup>-1</sup>;  $t_p$  – расчетный период использо- вания оборудования, лет.

Затраты на обслуживание оборудования опреде- ляются по выражению:

$$Z_{\text{обсл}} = 365 \cdot Z_{\text{обсл.сут}} \cdot t_p,$$

где  $Z_{\text{обсл.сут}}$  – стоимость затрат на промышленное об- служивание за одни сутки, тыс. р./сут.

Затраты на владение УЭЦН по схеме «сутко- прокат» определяются по выражению:

$$Z_{\text{прокат}} = 365 \cdot Z_{\text{прокат.сут}} \cdot t_p,$$

где  $Z_{\text{прокат.сут}}$  – стоимость «сутко-проката» за одни сутки, тыс. р./сут.

Затраты на мобилизацию оборудования определя- ются по выражению:

$$Z_{\text{моб}} = 365 \cdot \frac{Z_{\text{ед.моб}}}{\text{ННО}},$$

где  $Z_{\text{ед.моб}}$  – средняя стоимость мобилизации оборудо- вания конкретного производителя, тыс. р.; ННО – наработка на отказ оборудования, сут.

Если затраты на мобилизацию учтены в стоимости закупки, проката или обслуживания оборудования, то их можно не учитывать в выражениях (1) и (2).

Затраты на электроэнергию за расчетный период определяются по выражению:

$$Z_{\text{э/э}} = P_{\Sigma} \cdot c \cdot N \cdot t_p,$$

где  $P_{\Sigma}$  – активная мощность, потребляемая УЭЦН, кВт;  $c$  – тариф на электроэнергию, р./кВт·ч;  $N$  – коли- чество рабочих часов в году,  $N = 8760$  ч.

Активная мощность, потребляемая УЭЦН, опре- деляется мощностью, потребляемой погружным элек- тродвигателем, и потерями в системе передачи элек- троэнергии погружной установки [22]:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ПЭД}} + \sum \Delta P = P_{\text{ПЭД}} + \Delta P_{\text{ВКРМ}} + \Delta P_{\text{КЛ}} + \Delta P_{\text{ТР}} + \Delta P_{\text{СУ}} + \Delta P_{\text{СФ}} + \Delta P_{\text{СФ}} + \Delta P_{\text{ВФ}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ПЭД}}$  – активная мощность, потребляемая погруж- ным электродвигателем, кВт;  $\sum \Delta P$  – сумма потерь ак- тивной мощности в системе передачи электроэнергии погружной установки, кВт;  $\Delta P_{\text{ВКРМ}}$ ,  $\Delta P_{\text{КЛ}}$ ,  $\Delta P_{\text{ТР}}$ ,  $\Delta P_{\text{СУ}}$ ,  $\Delta P_{\text{СФ}}$ ,  $\Delta P_{\text{ВФ}}$  – потери активной мощности во внутрис- кважинном компенсаторе, кабельной линии, питаю- щем трансформаторе, станции управления, сетевом и выходном фильтре, соответственно, кВт.

При отсутствии одного из элементов в электротехни- ческом комплексе УЭЦН величину потерь, соответ- ствующую данному элементу, необходимо исключить из выражения (3). Потери активной мощности во внут- рискажинном компенсаторе, сетевом и выходном фильтрах в основном зависят от потерь мощности в конденсаторных батареях и в антирезонансных дроссе- лях, при их наличии. Потери активной мощности в со- временных косинусных конденсаторах не превышают 0,5 Вт на 1000 ВАр, поэтому их можно не учитывать. Принятое допущение незначительно повлияет на точ- ность определения стоимости владения УЭЦН. Потери активной мощности в кабельной линии определяются ее конструктивными характеристиками, температурой экс- плуатации и током погружного электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{КЛ}} = 3 \cdot I_{\text{ПЭД}}^2 \cdot 10^3 \cdot \rho \cdot \frac{L_{\text{КЛ}}}{S_{\text{КЛ}}} \cdot [1 + 0,004 \cdot (T - 20)],$$

где  $I_{\text{ПЭД}}$  – ток погружного электродвигателя, А;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $L_{\text{КЛ}}$  – длина кабельной линии, км;  $S_{\text{КЛ}}$  – сечение токопрово- дящей жилы кабельной линии, мм<sup>2</sup>;  $T$  – температура токопроводящих жил кабеля, °С.

В свою очередь, номинальный ток погружного электродвигателя определяется номинальной мощно- стью и напряжением, коэффициентом полезного дей- ствия и коэффициентом мощности:

$$I_{\text{ПЭД,ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}},$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность на валу погружного электродвигателя, кВт;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение погружного электродвигателя, В;  $\eta_{ном}$ ,  $\cos\phi_{ном}$  – номинальный коэффициент полезного действия и коэффициент мощности соответственно.

Потери активной мощности в питающем трансформаторе определяются по выражению:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot \left( \frac{S}{S_{ном}} \right)^2,$$

где  $\Delta P_{xx}$  – потери холостого хода питающего трансформатора, кВт;  $\Delta P_{кз}$  – потери короткого замыкания питающего трансформатора, кВт;  $S$ ,  $S_{ном}$  – полная мощность нагрузки и номинальная мощность питающего трансформатора соответственно, кВА.

Очевидно, что чем выше коэффициент мощности погружного электродвигателя и чем меньше полная мощность нагрузки, тем меньше затраты на электроэнергию. В связи с этим в нефтедобывающей отрасли наблюдается тенденция к использованию оборудования и технологии, позволяющих повысить коэффициент мощности. Одной из таких технологий является внутрискважинная компенсация реактивной мощности.

Затраты на спускоподъемные операции определяются средними затратами данной операции и количеством отказов оборудования:

$$Z_{СПО} = \frac{365 \cdot Z_{раб} \cdot t_{СПО} \cdot t_p}{ННО},$$

где  $Z_{раб}$  – средняя стоимость часа работы бригады текущего и капитального ремонта скважин, тыс. р./ч;  $t_{СПО}$  – продолжительность спускоподъемных операций, час.

Существуют различные методики определения наработки на отказ скважинного насосного оборудования. Согласно рекомендациям Экспертного совета по механизированной добыче нефти расчет наработки на отказ производится за скользящий год, а также за текущий месяц (за 30 или 31 день с начала анализируемого периода) и определяется по выражению:

$$ННО = \frac{T_{ННО}}{n},$$

где  $T_{ННО}$  – суммарное отработанное время скважинного насосного оборудования, сут.;  $n$  – количество отказов скважинного насосного оборудования за отчетный период, ед.

### Результаты моделирования

При использовании внутрискважинных компенсаторов в составе УЭЦН происходит увеличение затрат на закупку оборудования  $Z_{закуп}$  или на его прокат  $Z_{прокат}$ , величина которых зависит от договорных отношений между заказчиком и заводом-изготовителем оборудования для добычи нефти. В то же время оснащение УЭЦН внутрискважинными компенсаторами приводит к снижению затрат на электроэнергию  $Z_{э/э}$  за счет снижения токовой нагрузки электродвигателя. Произведем оценку снижения затрат на электроэнер-

гию  $Z_{э/э}$  при использовании ВКРМ. В качестве расчетного периода использования оборудования прием интервал в 1 год.

Рассмотрим участок системы электроснабжения куста скважин, оборудованных УЭЦН в количестве 4 единиц. Питание отдельной УЭЦН осуществляется от понижающей комплектной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ посредством кабеля марки КПБП и питающего трансформатора марки ТМПН-100/3 мощностью 100 кВА. Оптимальную мощность внутрискважинного компенсатора предлагается определить по методике, изложенной в [20]. Исходные и расчетные параметры УЭЦН приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры установки электроцентробежного насоса

Table 1. Parameters of electric centrifugal pump

Номер УЭЦН ESP number	Тип двигателя Engine type	Номинальная мощность ВКРМ, кВАР Nominal power SRPC*, kVAR	Длина кабельной линии, м Cable line length, m	Сечение кабельной линии, мм <sup>2</sup> Cable section, mm <sup>2</sup>	Активное сопротивление кабельной линии при 70 °С, Ом Active resistance of the cable line at 70 °C, Ohm
1	2ЭД-63-117	41,0	2500	16	3,23
2	2ЭД-63-117	41,0	2600	16	3,35
3	2ЭД-70-117	45,5	2700	16	3,48
4	2ЭД-70-117	45,5	2600	16	3,35

\*SRPC – submersible reactive power compensator.

Таблица 2. Параметры модели погружного асинхронного электродвигателя

Table 2. Parameters of the submersible induction motor model

Параметр Parameter	Значение/Value	
	2ЭД-63-117 2ED-63-117	2ЭД-70-117 2ED-70-117
Номинальное напряжение, В Rated voltage, V	1040	1190
Номинальная полная мощность, ВА Rated apparent power, VA	88757	103550
Активное сопротивление обмотки статора, Ом Active resistance of the stator winding, Ohm	1,0	1,35
Индуктивность обмотки статора, мГн Inductance of the stator winding, mH	3,17	4,3
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом Reduced active resistance of the rotor winding, Ohm	0,676	1,0
Приведенная индуктивность обмотки ротора, мГн Reduced inductance of the rotor winding, mH	3,17	4,3
Индуктивность контура намагничивания, мГн Inductance of the magnetization circuit, mH	67,0	70,0
Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup> Moment of rotor inertia, kg·m <sup>2</sup>	0,46	0,46
Коэффициент трения, Н·м·с Friction coefficient, N·m·s	0,022	0,04

Исследование энергетических и силовых показателей электротехнического комплекса УЭЦН выполнено в программном комплексе *MatLab Simulink*. В качестве модели погружного асинхронного электродвигателя принят блок «*asynchronous machinesquirrel cage*» библиотеки электротехнических устройств *SimPowerSystem*. Параметры модели рассматриваемых погружных электродвигателей 2ЭД-63-117 [23] и 2ЭД-70-117 [24] приведены в табл. 2.

В работах [23, 24] авторами проведена верификация моделей рассматриваемых погружных электродвигателей с результатами стендовых испытаний. Установлено, что относительная погрешность полученных электромеханических характеристик на модели в номинальном режиме не превышает 5 %. Следовательно, принятые модели удовлетворяют требованию адекватности отображаемых характеристик.

В *MatLab Simulink* блок «*three-phase transformer (two windings)*» (трехфазный двух обмоточный трансформатор) описывается классической Т-образной схемой замещения. За базисные величины рассматриваемого трансформатора марки ТМПН-100/3 принимаются номинальные напряжения первичной обмотки 380 В и вторичной обмотки 1250 В, номинальная мощность 100 кВА и частота 50 Гц. Активное сопротивление первичной и приведенное сопротивление вторичной обмоток принимаются 0,00985 о.е. Индуктивность первичной и приведенная индуктивность вторичной обмоток принимаются 0,0255 о.е. Активное сопротивление контура намагничивания – 337 о.е. Индуктивность, учитывающая реактивные потери в сердечнике, – 52 о.е. Выбор отпайки питающего трансформатора (напряжение вторичной обмотки) производился из условия поддержания напряжения на погружном электродвигателе близким к номинальному значению с учетом падения напряжения в кабельной линии и вторичной обмотке трансформатора.

**Таблица 3.** Затраты на электроэнергию

**Table 3.** Electricity costs

Номер УЭЦН ESP number	Активная мощность, кВт Active power, kW		Коэффициент мощности Power factor		Ток, А Current, A		Затраты на электроэнергию $Z_{3/3}$ , тыс. р. Electricity costs $C_{el}$ , thousand rub.	
	ВКРМ SRPC	Без ВКРМ Without SRPC	ВКРМ SRPC	Без ВКРМ Without SRPC	ВКРМ SRPC	Без ВКРМ Without SRPC	ВКРМ SRPC	Без ВКРМ Without SRPC
1	94,3	103,7	0,98	0,88	146,3	178,2	2891,2	3179,4
2	95,5	105,4	0,98	0,89	148,2	180,0	2928,0	3231,6
3	97,8	107,0	0,98	0,87	152,1	186,0	2998,5	3280,6
4	96,2	105,7	0,98	0,87	150,6	184,8	2949,5	3240,8

При определении затрат на электроэнергию  $Z_{3/3}$  принят тариф 3,5 р./кВт·ч.

Анализ данных табл. 3 показал, что при использовании внутрискважинных компенсаторов наблюдается снижение затрат на электроэнергию. Снижение затрат на исследуемой УЭЦН под номером 1 составило 288,2 тыс. р., на УЭЦН под номером 3 – 282,1 тыс. р., на УЭЦН под номером 4 – 291,3 тыс. р. Максимальное снижение затрат на электроэнергию составило 303,6 тыс. р. в год для установки электроцентробежного насоса под номером 2.

Погонная продольная индуктивность кабеля марки КГБП принята 0,24 мГн/км, погонная емкость – 0,1 мкФ/км. Современные кабели для установок погружных электронасосов, выпускаемые отечественными и зарубежными производителями, обладают высоким электрическим сопротивлением изоляции. В зависимости от температурного исполнения пересчитанное на 1 км длины кабеля сопротивление изоляции должно составлять не менее 15 МОм, а ток утечки, замеренный в конце испытания напряжением и пересчитанный на 1 км длины при температуре 20 °С, не должен превышать 50 мА. Так как активное сопротивление токопроводящей жилы 1 км кабеля достаточно мало по сравнению с сопротивлением изоляции, то последнее можно не учитывать. Принятое допущение незначительно повлияет на результаты моделирования.

Имитационная модель рассматриваемого участка системы электроснабжения куста скважин приведена на рис. 1.

Механическая характеристика момента насосной нагрузки на валу погружного электродвигателя описывается выражением [25]:

$$M_c = M_0 + (M_0 - M_{ном}) \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right) \cdot \sqrt{\frac{H_0 \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - H_c}{H_0 - H_c}},$$

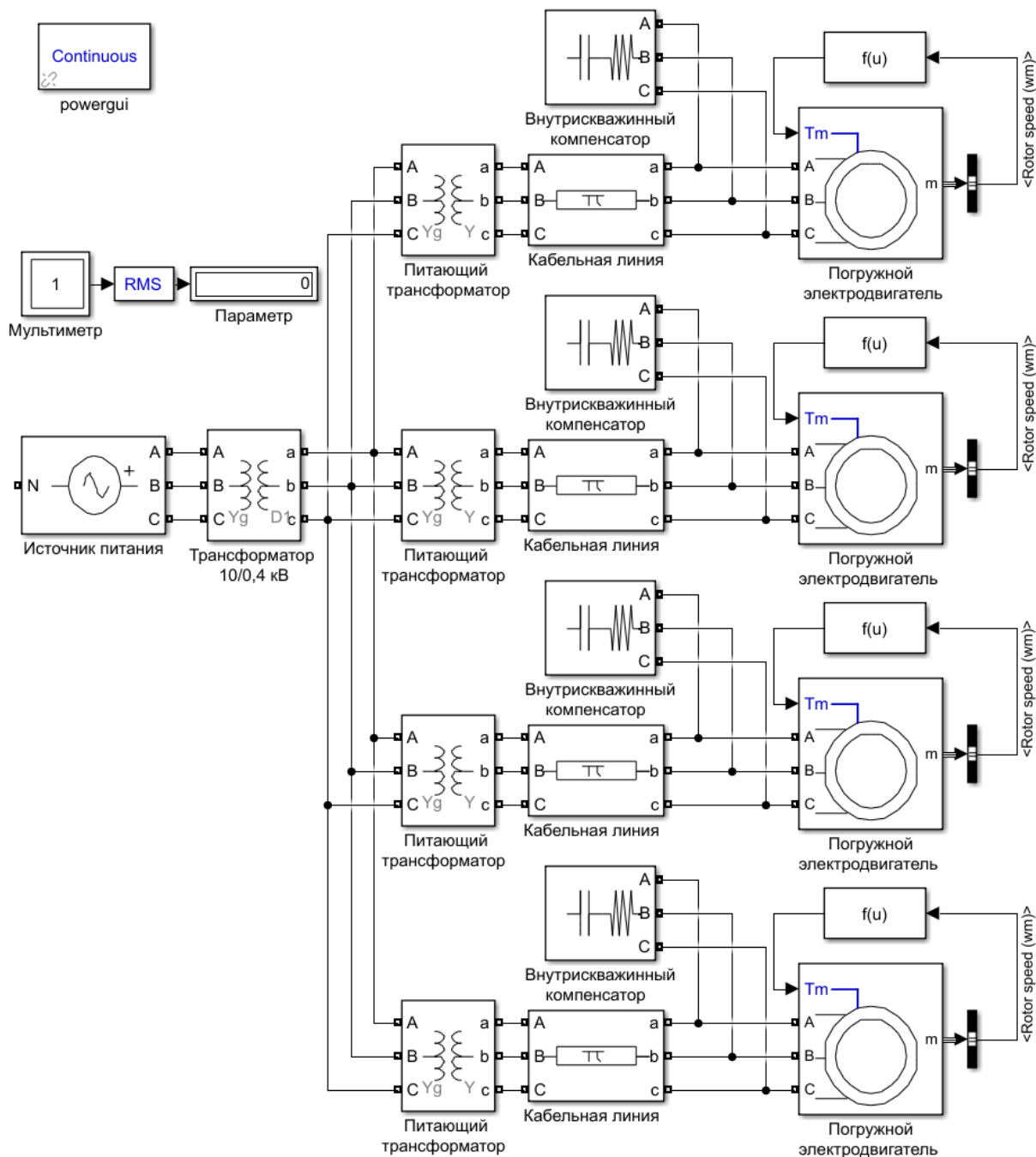
где  $M_0$  – момент холостого хода, Н·м;  $M_{ном}$  – момент сопротивления при номинальной нагрузке, Н·м;  $\omega$  – угловая скорость вала центробежного насоса, рад/с;  $\omega_{ном}$  – номинальная угловая скорость вала центробежного насоса, рад/с;  $H_0$  – напор насоса при нулевой подаче, м;  $H_c$  – статический напор, м.

Результаты моделирования при коэффициенте загрузки погружных электродвигателей равном 100 % приведены в табл. 3.

Стоит отметить, что при использовании ВКРМ отсутствует необходимость в установке и подключении компенсирующих устройств к шинам комплектной трансформаторной подстанции. Дополнительный экономический эффект определяется по выражению:

$$Z_{КУ} = Z_{КУ.закуп} + Z_{КУ.обсл} + Z_{КУ.моб},$$

где  $Z_{КУ.закуп}$  – затраты на закупку компенсирующих устройств, тыс. р.;  $Z_{КУ.обсл}$  – затраты на обслуживание компенсирующих устройств, тыс. р.;  $Z_{КУ.моб}$  – затраты на мобилизацию компенсирующих устройств, тыс. р.



**Рис. 1.** Имитационная модель участка системы электроснабжения куста скважин:  $f(u)$  – блок задания функции, имитирующий работу электроцентробежного насоса

**Fig. 1.** Simulation model of the section of power supply system cluster of oil wells:  $f(u)$  – function setting block, imitating electrocentrifugal pump operation

#### Выводы

1. Обоснована перспективность и экономическая целесообразность внедрения внутрискважинных компенсаторов в составе установок электроцентробежных насосов на нефтедобывающих скважинах.
2. Разработана методика расчета совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором.

3. Разработана в программном комплексе MatLab Simulink имитационная модель участка системы электроснабжения куста нефтедобывающих скважин, оснащенных установками электроцентробежных насосов с внутрискважинными компенсаторами. В ходе имитационного моделирования определены энергетические и силовые показатели. Максимальное снижение затрат на электроэнергию при использовании внутрискважинных компенсаторов составило 9,4 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
- Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes / V.Z. Kovalev, O.V. Arhipova, S.S. Esin, A.A. Tatevosyan, A.G. Scherbakov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – V. 1260. – № 052014. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052014.
- Identification of parameters of power circuits pulse energy conversion systems of electromechanical equipment / E.A. Godovnikov, E.G. Andreeva, V.Z. Kovalev, R.T. Usmanov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – V. 1260. – № 052007. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052007.
- Willems J.L. Reflections on apparent power and power factor in nonsinusoidal and polyphase situations. – IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – V. 19. – Iss. 2. – P. 835–840. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.823182.
- Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- Кубарьков Ю.П., Голубева К.А., Макаров Я.В. Выбор мощности компенсирующих устройств для оптимизации уровней потерь в электрической сети // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2016. – № 4 (52). – С. 77–82.
- Kuchanskyy V., Malakhatka D., Ihor B. Application of reactive power compensation devices for increasing efficiency of bulk electrical power systems // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160072.
- Индивидуальная компенсация реактивной мощности электротехнического комплекса добывающей скважины с электроцентробежным насосом / Т.В. Табачникова, Р.И. Гарифуллин, Э.Д. Нурбосынов, А.В. Махт // Промышленная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 44–46.
- Takacs G. Electrical submersible pump components and their operational features // Electrical Submersible Pumps Manual. – 2018. – P. 55–152. DOI: 10.1016/b978-0-12-814570-8.00003-9.
- Влияние внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в элементах электротехнического комплекса добывающей скважины / В.А. Копырин, О.В. Смирнов, А.В. Портнягин, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 117–124.
- Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.
- Mathematical modeling start-up and steady state modes of asynchronous motors operation with capacitive compensation of reactive power / V. Malyar, O. Namola, V. Maday, I. Vasylychshyn // Przegląd Elektrotechniczny. – 2020. – V. 96. – Iss. 11. – P. 109–114. DOI: 10.15199/48.2020.11.22.
- Large synchronous motors as drivers for centrifugal compressors in lng liquefaction plants / D. Ristanovic, M. Taher, T. Getschmann, N. Bhatia // 2019 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC). – Vancouver, BC, Canada, 9–12 September 2019. DOI: 10.1109/PCIC30934.2019.9074535.
- Okhrimenko V., Glebova M. Methodology calculation for reactive power compensation in industrial enterprises // International Journal of Design and Nature and Ecodynamics. – 2020. – V. 15. – Iss. 4. – P. 465–471. DOI: 10.18280/ijdne.150402.
- Sayenko Y., Baranenko T., Kalyuzhnyi D. Compensation of reactive power in electrical supply systems of large industrial enterprises // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – V. 91. – Iss. 11. – P. 77–80. DOI: 10.15199/48.2015.11.22.
- An index for determination and manipulation of steady state voltage stability of transmission and distribution infrastructures / B.A. Bhatti, R. Broadwater, M. Dilek, A. Tbaileh // 2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). – Chicago, IL, USA, 12–15 October 2020. DOI: 10.1109/TD39804.2020.9299938.
- Theoretical and practical studies of electrical systems operation modes at reactive power compensation / I. Khomenko, M. Piskurevy, O. Plakhtii, I. Stasiuk, N. Karpenko, V. Nerubatskyi // 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. DOI: 10.1109/IEPS51250.2020.9263225.
- Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Нелинейная модель системы электропитания погружных объектов с учетом изменения длины кабель-троса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 114–123.
- Determination of the downhole compensator's optimal power considering the cable line's length and cross section / V.A. Kopyrin, M.V. Deneko, E.A. Engel, R.N. Khamitov // 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, Russia, 10–12 November 2020. DOI: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306151.
- Ganesh K., Mohapatra S. Enterprise resource planning: fundamentals of design and implementation. – Springer, 2014. – 174 p.
- Семисынов Р.А., Киселев Е.С., Хакимянов М.И. Анализ потерь энергии в технологических элементах установок скважинных нефтедобывающих насосов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 6. – С. 179–198.
- Копырин В.А., Смирнов О.В., Денек М.В. Simulation modeling of the submersible asynchronous motor's operation modes // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, Russia, 3–7 October 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602539.
- Performance characteristics' study of a submersible electric motor based on the bench tests results / V.A. Kopyrin, R.N. Khamitov, L.V. Shakhova, S.O. Chashchin, M.V. Deneko // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – V. 1546. – № 012047. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012047.
- Ершов М.С., Егоров А.В., Трифионов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. – М.: ИД «Недра», 2010. – 319 с.

Поступила 08.02.2021 г.

## Информация об авторах

**Копырин В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Хамитов Р.Н.**, доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**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.

**Кладиев С.Н.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Раков И.В.**, инженер-проектировщик АСУ ТП, ООО Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания».

**Портнягин А.Л.**, кандидат технических наук, директор Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

**Маркова А.А.**, магистрант кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

UDC 621.31, 622.276.054

## EVALUATION OF TOTAL COST OF POSSESSING THE ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP WITH SUBMERSIBLE COMPENSATOR

Vladimir A. Kopyrin<sup>1</sup>,  
kopyrinva@gmail.com

Rustam N. Khamitov<sup>2,1</sup>,  
apple\_27@mail.ru

Alexander S. Glazyrin<sup>3,4</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Sergey N. Kladiev<sup>3</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Ivan V. Rakov<sup>5</sup>,  
rakovivan@live.com

Aleksei L. Portnyagin<sup>1</sup>,  
pal1979@mail.ru

Anastasia A. Markova<sup>1</sup>,  
aamarkova72@gmail.com

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen,  
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

<sup>2</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>4</sup> Yugra State University,  
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

<sup>5</sup> Scientific Manufacturing Enterprise «Tomsk Electronic Company», Ltd.,  
33, Vysotsky street, Tomsk, 634040.

**The relevance.** Today, the production of oil is generally carried out in a mechanized manner, which is sufficiently energy intensive. In the cost structure of oil production, the value of electric power is from 30 to 35 % of the value. Considering that the submersible plants oil production is impossible without loss of power that is 20 to 40 % power consumption, the technology to increase the energy efficiency oil production has a high potential of embedding. One of the promising directions of electric power consumption reduction by submersible installations is the technology of submersible compensation. On the one hand, the introduction of the submersible compensator results in increase of the cost of purchase, maintenance, mobilization or hire of the submersible plant. On the other hand, the use of submersible compensator reactive power results in reduction of the cost of electric power and increase in production efficiency. The use of submersible compensators makes it possible to reduce the loss of active power in the power transmission system of the submersible installation by reducing the reactive component of the current submersible motor. However, with different technical characteristics of the submersible installation equipment, the effect of the submersible compensator will be different. In this relation, it should be avoided that the cost of introduction of the submersible compensators will be higher than the positive effect of introduction. It is necessary to determine the aggregate cost of possession of an electric centrifugal pump installation with a submersible compensator reactive power.

**The aim** of the research is to analyze the reduction of current electric power consumption with the use of the installations electric centrifugal pumps with the submersible compensator reactive power.

**The object:** portion of the power supply system of a cluster oil producing wells equipped with installations electric centrifugal pump.

**Methods:** laws of electrical engineering theory, electric drive theory, simulation methods and technical-economic rationale. Imitation modeling of a portion of the power supply system of the well cluster is performed in a Software Complex of MatLab Simulink.

**Result.** The paper describes the method of calculation of aggregate cost of possession of electric centrifugal pump with submersible compensator. The software model of the section power supply system of the well cluster is built in the MATLAB Simulink. It was found that the use of submersible compensators results in reduction in power consumption at the ownership of a submerged installation. The maximum reduction in power consumption on one of the test submersible units was 303,6 thousand rubles in year.

### Key words:

Submersible electric centrifugal pump, total cost of ownership, electrical energy, submersible compensator, simulation model, submersible electric motor.

### REFERENCES

1. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standart 32144–2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Electricity quality standards in general-purpose power supply system's]. Moscow, StandardInform Publ., 2014. 19 p.
2. Kovalev V.Z., Arhipova O.V., Esin S.S., Tatevosyan A.A., Scherbakov A.G. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2019, vol. 1260, no. 052014. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052014.
3. Godovnikov E.A., Andreeva E.G., Kovalev V.Z., Usmanov R.T. Identification of parameters of power circuits pulse energy conversion systems of electromechanical equipment. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2019, vol. 1260, no. 052007. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052007.
4. Willems J.L. Reflections on apparent power and power factor in nonsinusoidal and polyphase situations. *IEEE Transactions on*

- Power Delivery*, 2004, vol. 19, Iss. 2, pp. 835–840. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.823182.
5. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Indicators of power quality and their control in industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
  6. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Loss of electricity. Reactive power. Quality of electricity: a guide for practical calculations]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p.
  7. Kubarkov Yu.P., Golubeva K.A., Makarov Ya.V. Vybor moshchnosti kompensiruyushchikh ustroystv dlya optimizatsii urovney poter v elektricheskoy seti [The choice of the power of compensating devices to optimize the levels of losses in the electrical network]. *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences*, 2016, no. 4 (52), pp. 77–82.
  8. Kuchanskyy V., Malakhata D., Ihor B. Application of reactive power compensation devices for increasing efficiency of bulk electrical power systems. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160072.
  9. Tabachnikova T.V., Garifullin R.L., Nurbosynov E.D., Macht A.V. Individualnaya kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa dobyvayushchey skvazhiny s elektrosentrobezhnym nasosom [Individual compensation of the reactive power of the electrical complex of a producing well with an electric centrifugal pump]. *Prom energy*, 2015, no. 2, pp. 44–46.
  10. Takacs G. Electrical submersible pump components and their operational features. *Electrical Submersible Pumps Manual*, 2018, pp. 55–152. DOI:10.1016/b978-0-12-814570-8.00003-9.
  11. Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Portnyagin A.V., Khamitov R.N. The influence of the downhole compensator on the voltage drop in the elements of the production well's electrical system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 117–124. In Rus.
  12. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.
  13. Malyar V., Hamola O., Maday V., Vasylyshyn I. Mathematical modeling start-up and steady state modes of asynchronous motors operation with capacitive compensation of reactive power. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2020, vol. 96, Iss. 11, pp. 109–114. DOI: 10.15199/48.2020.11.22.
  14. Ristanovic D., Taher M., Getschmann T., Bhatia N. Large synchronous motors as drivers for centrifugal compressors in lng liquefaction plants. *2019 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC)*. Vancouver, BC, Canada, 9–12 September 2019. DOI: 10.1109/PCIC30934.2019.9074535.
  15. Okhrimenko V., Glebova M. Methodology calculation for reactive power compensation in industrial enterprises. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 2020, vol. 15, Iss. 4, pp. 465–471. DOI: 10.18280/ijdne.150402.
  16. Sayenko Y., Baranenko T., Kalyuzhnyi D. Compensation of reactive power in electrical supply systems of large industrial enterprises. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2015, vol. 91, Iss. 11, pp. 77–80. DOI: 10.15199/48.2015.11.22.
  17. Bhatti B.A., Broadwater R., Dilek M., Tbaileh A. An index for determination and manipulation of steady state voltage stability of transmission and distribution infrastructures. *2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. Chicago, IL, USA, 12–15 October 2020. DOI: 10.1109/TD39804.2020.9299938.
  18. Khomenko I., Piskurevy M., Plakhtii O., Stasiuk I., Karpenko N., Nerubatskyi V. Theoretical and practical studies of electrical systems operation modes at reactive power compensation. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. DOI: 10.1109/IEPS51250.2020.9263225.
  19. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Nonlinear power supply model of submersible objects based on change in the cable-rope length. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 114–123. In Rus.
  20. Kopyrin V.A., Deneko M.V., Engel E.A., Khamitov R.N. Determination of the downhole compensator's optimal power considering the cable line's length and cross section. *2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. Omsk, Russia, 10–12 November 2020. DOI: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306151.
  21. Ganesh K., Mohapatra S. *Enterprise resource planning: fundamentals of design and implementation*. Springer, 2014. 174 p.
  22. Semisynov R.A., Kiselev E.S., Khakimyanov M.I. Analiz poter energii v tekhnologicheskikh elementakh ustanovok skvazhinnykh nefte dobyvayushchikh nasosov [Analysis of energy losses in technological elements of installations of borehole oil-producing pumps]. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*, 2015, no. 6, pp. 179–198.
  23. Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Deneko M.V. Simulation modeling of the submersible asynchronous motor's operation modes. *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, Russia, 3–7 October 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602539.
  24. Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Shakhova L.V., Chashchin S.O., Deneko M.V. Performance characteristics' study of a submersible electric motor based on the bench tests results. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2020, vol. 1546, no. 012047. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012047.
  25. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. *Ustoychivost promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem* [Stability of industrial electrical systems]. Moscow, Nedra Publishing House LLC Publ., 2010. 319 p.

Received: 8 February 2021.

#### Information about the authors

**Vladimir A. Kopyrin**, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

**Rustam N. Khamitov**, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University; professor, Tyumen Industrial University.

**Alexander S. Glazyrin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yugra State University.

**Sergey N. Kladiev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ivan V. Rakov**, design engineer, Scientific Manufacturing Enterprise «Tomsk Electronic Company».

**Aleksei L. Portnyagin**, Cand. Sc., director of the geology and gas-oil production institute of Industrial University of Tyumen.

**Anastasia A. Markova**, master student, Industrial University of Tyumen.



УДК 556.114:553.411(571.56)

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ ВОД ТЕРРИТОРИИ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЬЮН (РЕСПУБЛИКА САХА-(ЯКУТИЯ))

**Язиков Егор Григорьевич<sup>1</sup>,**  
yazikoveg@tpu.ru

**Мишанькин Андрей Юрьевич<sup>1</sup>,**  
aym13@tpu.ru

**Осипова Нина Александровна<sup>1</sup>,**  
osipova@tpu.ru

**Филимоненко Екатерина Анатольевна<sup>1</sup>,**  
filimonenkoea@mail.ru

**Карпенко Юрий Андреевич<sup>1</sup>,**  
karpenkouyriy92@gmail.com

**Собянин Юрий Петрович<sup>2</sup>,**  
yuri\_sob63@mail.ru

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

<sup>2</sup> ООО «Богуславец»,  
Россия, 677027, г. Якутск, ул. Кирова, 18.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью получения данных о состоянии природных поверхностных вод территорий золоторудных объектов, расположенных в области криолитозоны субарктического пояса.

**Цель:** выявление геохимических особенностей природных вод территории золоторудного месторождения Вьюн на предэксплуатационной стадии его освоения.

**Объект:** поверхностные воды территории золоторудного месторождения Вьюн.

**Фактические материалы и методы исследования.** Фактический материал получен в результате выполнения научно-исследовательских работ, которые проводились в 2017 г. сотрудниками кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета. В данной работе обсуждаются результаты исследований территории золоторудного месторождения Вьюн по данным изучения водотоков, из которых было отобрано 13 проб воды. Пробы отбирались и обрабатывались по стандартным методикам в соответствии с нормативными документами. Элементный состав воды устанавливался методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на содержание 71 химического элемента в аккредитованной Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» Национального исследовательского Томского политехнического университета. Для установления гидрохимических характеристик вод образцы были проанализированы комплексом методов: титриметрическим; потенциометрическим; кондуктометрическим; гравиметрическим; фотоколориметрическим; спектрофотометрическим; методом ионной хроматографии, а также с помощью расчетных методик в НОЦ «Вода». Результаты обрабатывались в программах Microsoft Excel и Statistica. Схемы и диаграммы строились при помощи графического редактора Corel Draw.

**Результаты.** Выявлены геохимические особенности природных вод водотоков золоторудного месторождения Вьюн в условиях вечной мерзлоты. Установлено наличие контрастных аномалий химических элементов, представленных мышьяком и ртутью. Данные элементы являются спутниками малосульфидного золото кварцевого оруденения.

### **Ключевые слова:**

Золоторудное месторождение Вьюн, поверхностные воды, гидрогеохимические показатели, элементный состав, геохимические особенности.

### **Введение**

Изучению геохимии природных вод рудных месторождений посвящено большое количество работ, в которых зачастую уделяется внимание вопросам формирования состава вод под воздействием различных характеристик природных условий и геологической среды: Ю.Ф. Погребняк [1, 2], В.Н. Макаров [3], А.М. Плюснин [4], Е.М. Дутова [5]. Есть работы, посвященные особенностям водной миграции и концентрированию рудогенных элементов под влиянием различных условий, а также выделяются физико-

химические исследования, касающиеся влияния параметров геохимической среды на миграционные процессы [6].

Проблемой формирования геохимических полей в районах распространения многолетнемерзлых пород занимались И.П. Винокуров, А.М. Иванова, Н.П. Чибисов, С.Л. Шварцев начиная с 60-х гг. прошлого века. Первым исследователем, обосновавшим необходимость учёта криогенных процессов при изучении условий формирования месторождений полезных ископаемых в криолитозоне, был известный мерзлото-

вед, член-корр. АН СССР П.Ф. Швецов [7]. Отдельное внимание исследователей уделялось объектам золотодобычи [8, 9].

Перспективы расширения ресурсной базы золота в России в последнее время связываются с Яно-Колымской провинцией (Восточная часть Республики Саха-Якутия и Северо-Запад Магаданской области) [10–12].

Интересным с точки зрения оценки ресурсов золота является золоторудное месторождение Вьюн (Республика Саха-Якутия), открытое в 1974 г. [13]. Данный объект локализован в Эльгенджинском рудно-россыпном узле Адыча-Тарынской золотоносной зоны и в более широком смысле относится к Яно-Колымской провинции. В 2017 г. были начаты поисково-оценочные работы на новых перспективных участках месторождения, что и послужило проведению комплексных эколого-геохимических исследова-

ний для оценки фоновых концентраций элементов в природных компонентах окружающей среды на данных территориях.

Данная работа направлена на изучение гидрогеохимических показателей и установление фоновых концентраций химических элементов в природных водах территории золоторудного месторождения Вьюн на доэксплуатационной стадии работ в условиях вечной мерзлоты.

#### Характеристика исследуемой территории

Золоторудное месторождение Вьюн расположено в Азиатской части России (рис. 1, а), на территории Верхоянского района Республики Саха (Якутия), в 550 км к северо-востоку от административного центра Республики – г. Якутска (рис. 1, б, в), в центральной части одноименного рудного поля.

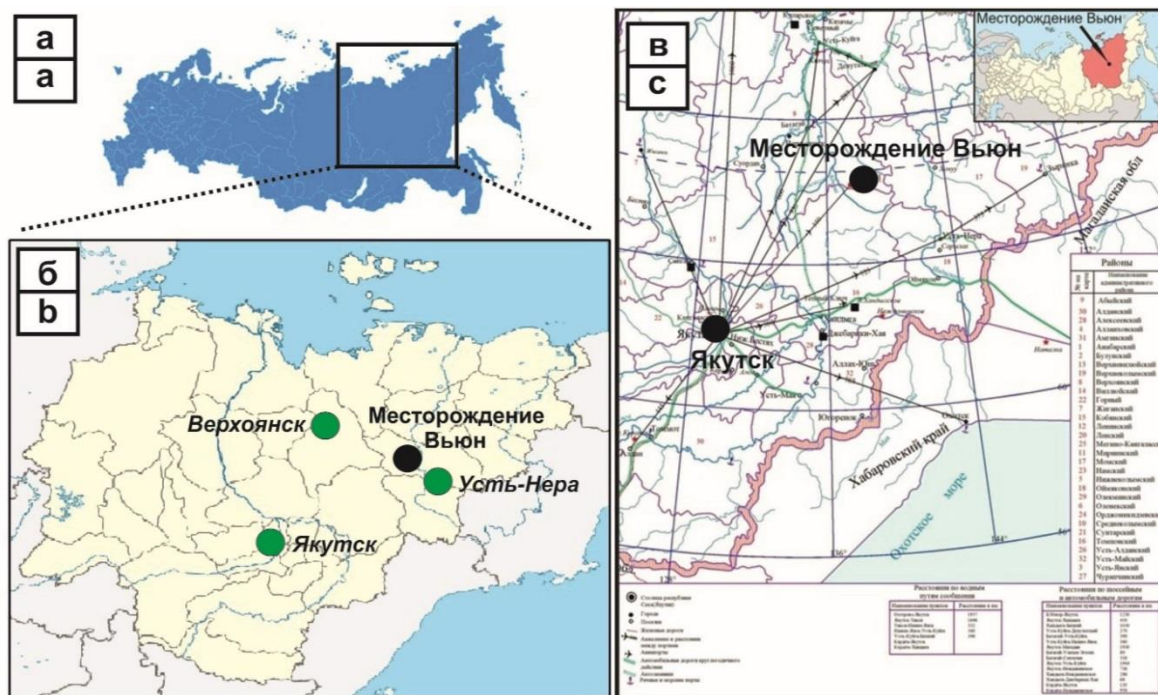


Рис. 1. Республика Саха (Якутия) на карте Российской Федерации (а) [14] и схемы расположения золоторудного месторождения Вьюн на территории Республики (б, в) [15]

Fig. 1. The Republic of Sakha (Yakutia) on the map of the Russian Federation (a) [14] and the location of the Vyun gold deposit on the territory of the Republic (b, c) [15]

Район месторождения характеризуется среднегорным рельефом, который местами достигает до высокогорного, относится к субарктической зоне с суровым резко-континентальным климатом.

В районе месторождения наблюдается сплошное распространение многолетнемерзлых пород мощностью от 200 до 350 м. Глубина сезонного протаивания грунтов не превышает 1 м [13].

Поверхностные воды представлены горным ручьём Вьюн, его притоками (временные водотоки) и рекой Бурганджа, которая является правым притоком реки Эльгенджа (верховье бассейна реки Джолокаг). В совокупности данные водотоки относятся к правобережному бассейну реки Адычи, которая является правым притоком реки Яны.

Водотоки характеризуются быстрым течением, незначительной глубиной и отличаются крайне непостоянным в зависимости от сезона режимом.

В геологическом плане золоторудное месторождение Вьюн входит в состав Эльгенджинского рудно-россыпного узла Адычанской золотоносной зоны, а в более широком смысле является частью Яно-Колымского пояса [8].

Территорию месторождения составляют терригенные отложения (аргиллиты, алевролиты) верхнетриасового возраста, которые располагаются в периферической части надинтрузивной зоны не вскрытого Бурганджинского гранитоидного массива. В границах месторождения установлены дайки кислого состава раннемелового возраста.

Рудоносная структура месторождения Вьюн представлена кварцево-жильной зоной и характеризуется малосульфидными золотокварцевыми рудами. Промышленная золотоносность руд определяется золотопирит-арсенопиритовым и золото-халькопирит-галенитовым парагенезисами. Главным минералом руд является жильный кварц с включениями золота [8, 13].

Геоэкологические особенности территории месторождения Вьюн являются типичными для территорий горнопромышленного освоения Республики Саха (Якутия) в целом. В границах исследуемой территории геоэкологическая обстановка определяется, прежде всего, совокупностью природных (геологических, геоморфологических, геохимических, мерзлотно-геологических и инженерно-криогеологических) факторов, формирующих современные ландшафты. В пределах месторождения отсутствуют памятники археологии, особо охраняемые территории и другие объекты, ограничивающие строительство горнодобывающего предприятия (заповедники, заказники, земли историко-культурного назначения, курортные зоны и зоны отдыха).

По данным экологического районирования России, территория золоторудного месторождения Вьюн относится к Верхояно-Колымскому экорегиону и имеет II (низкий) ранг экологической напряжённости. Доминирующим фактором влияния на остроту экологической обстановки является распространённость многолетнемерзлых пород [16].

#### Методика проведения работ

На территории золоторудного месторождения Вьюн в летний период 2017 г. были проведены комплексные эколого-геохимические исследования, организованные в соответствии с требованиями «Методических рекомендаций по применению Классифика-

ции запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Золото рудное», утвержденных распоряжением Министерства природных ресурсов России от 05.06.2007 г. Эколого-геохимические работы на месторождении проводились с соблюдением существующих методических подходов и рекомендаций для такого вида исследований [17, 18]. Отбор проб компонентов природной среды осуществлялся в строгом соответствии с нормативными документами, регламентирующими процедуры пробоотбора, с фиксацией координат расположения точек опробования и погодных условий на момент проведения работ.

Лабораторно-аналитические работы для установления химического и элементного составов отобранных проб производились в аккредитованных лабораториях г. Томска по аттестованным методикам.

В данной работе обсуждаются результаты гидрогеохимического опробования природных поверхностных вод водотоков. Отбор проб воды на территории золоторудного месторождения Вьюн осуществлялся из четырех водотоков: ручья Вьюн (6 проб воды); правого притока ручья Вьюн (2 пробы); левого притока ручья Вьюн (2 пробы); реки Бурганджа (3 пробы).

Всего было отобрано и изучено 13 проб природных поверхностных вод.

Расположение пунктов отбора проб показано на рис. 2.

Предварительная подготовка проб воды заключалась в их консервации для определения таких показателей, как химическое потребление кислорода (ХПК) (консервант – серная кислота),  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  (консервант – хлороформ). Для определения гидрохимических показателей и содержаний химических элементов консервация проб воды не требовалась.

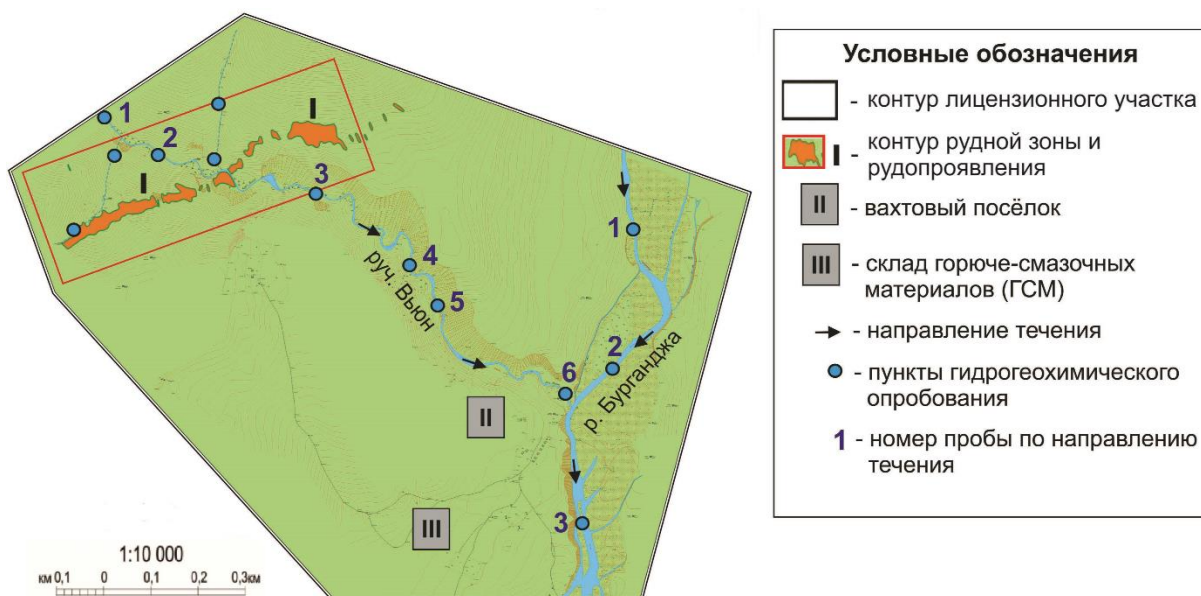


Рис. 2. Схема пунктов гидрогеохимического опробования водотоков золоторудного месторождения Вьюн  
Fig. 2. Scheme of places for hydrogeochemical watercourses sampling of the Vyun gold ore deposit area

Элементный анализ проб на содержание 71 химического элемента (Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U) проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в аккредитованной Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НОЦ «Вода» отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Для установления химических характеристик природных поверхностных вод образцы были проанализированы комплексом методов: титриметрическим ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , общая жесткость,  $\text{Ca}^{2+}$ , ХПК); потенциометрическим (рН, F<sup>-</sup>); кондуктометрическим (электропроводность); гравиметрическим (взвешенные вещества); фотоколориметрическим ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ); спектрофотометрическим ( $\text{SO}_4^{2-}$ ); методом ионной хроматографии ( $\text{NO}_3^-$ ); по расчетным методикам ( $\text{Mg}^{2+}$ , минерализация) в НОЦ «Вода».

Статистическая обработка данных включала в себя оценку числовых характеристик содержаний химиче-

ских элементов, соединений и гидрохимических показателей, анализ их распределения и выявление значимых связей между ними.

Основным результатом исследования являлось установление геохимической специализации природных поверхностных вод водотоков, с целью чего рассчитывались отношения содержаний элементов в воде к эталонному уровню, т. е. кларк концентрации химических элементов, который является показателем уровня аномальности содержаний элементов относительно того или иного критерия [18].

В данной работе при расчёте кларков концентрации химических элементов в водах водотоков в качестве эталона применялся кларк речных вод по А.П. Виноградову [19].

Обработка данных лабораторно-аналитических исследований проводилась с использованием программного комплекса Statistica 10.0.

### Результаты и их обсуждение

Средние значения содержаний ионов и гидрохимических показателей в природных поверхностных водах водотоков на территории месторождения Вьюн приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Средние значения содержаний ионов и гидрохимических показателей в природных поверхностных водах водотоков на территории месторождения Вьюн

**Table 1.** Average values of ion contents and hydrochemical indicators in natural surface waters of streams in the territory of the Vyun field

Показатели Indicators	Единицы измерения Units	Значение Value	Показатели Indicators	Единицы измерения Units	Значение Value
рН	Единицы рН/Units рН	7,1±0,1	Мин.	мг/л mg/l	32,2±4,1
$\text{CO}_2$	мг/л mg/l	4,87±0,29	ХПК		16,2±1,9
$\text{HCO}_3^-$		15,4±3,1	Эл-ть	0,05±0,003	
$\text{SO}_4^{2-}$		7,69±1,11	ВВ	1,99±0,44	
$\text{Cl}^-$		0,56±0,06	$\text{NH}_4^+$	0,36±0,08	
ОЖ	ммоль-экв./л. mmol-equiv./l	0,57±0,06	$\text{NO}_3^-$	мг/л mg/l	0,65±0,06
$\text{Ca}^{2+}$	мг/л mg/l	6,93±0,73	$\text{PO}_4^{3-}$		0,19±0,007
$\text{Mg}^{2+}$		2,68±0,28	–	–	–
Количество проб/Number of samples					13

Примечание. 1) ОЖ – общая жесткость; 2) Мин. – минерализация; 3) Эл-ть – электропроводность; 4) ВВ – взвешенные вещества. Среднее значение ± стандартная ошибка, аномальные значения при расчете средних не учитывались. Содержания  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$  ниже предела обнаружения.

Notes. 1) ОЖ – general hardness; 2) Мин. – mineralization; 3) Эл-ть – electrical conductivity; 4) ВВ – suspended solids. Mean value ± standard error, abnormal values were not taken into account when calculating the means. The content of  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$  is below the detection limit.

В качестве средних значений изучаемых показателей в природных водах месторождения были приняты средние арифметические значения.

В ходе статистической обработки данных о содержаниях ионов, химических элементов, а также величин значений гидрохимических показателей выявлено, что наименьшей вариативностью в природных поверхностных водах месторождения Вьюн характеризуются показатели рН и электропроводность, а также  $\text{CO}_2$ . Повышенные значения коэффициента вариации (36–49 %) в пробах воды из водотоков характерны для ХПК, минерализации и концентраций некоторых ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ).

Разброс концентраций изучаемых компонентов иллюстрирует диаграмма размаха (рис. 3).

Проведённые исследования показали, что по значению водородного показателя природные поверхностные воды месторождения являются преимущественно нейтральными со значением рН около 7,0 (исключение составляют лишь слабокислые воды правого притока ручья Вьюн с рН 6,4), характеризуются как ультрапресные и очень мягкие.

Воды в исследованных водотоках разделяются на два типа: сульфатно-гидрокарбонатный магниевый кальциевый (левый приток ручья Вьюн, ручей Вьюн и река Бурганджа) и гидрокарбонатно-сульфатный магниевый кальциевый (правый приток ручья Вьюн). Различие данных типов вод заключается в небольшой разнице во взаимозамещении анионов  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ .

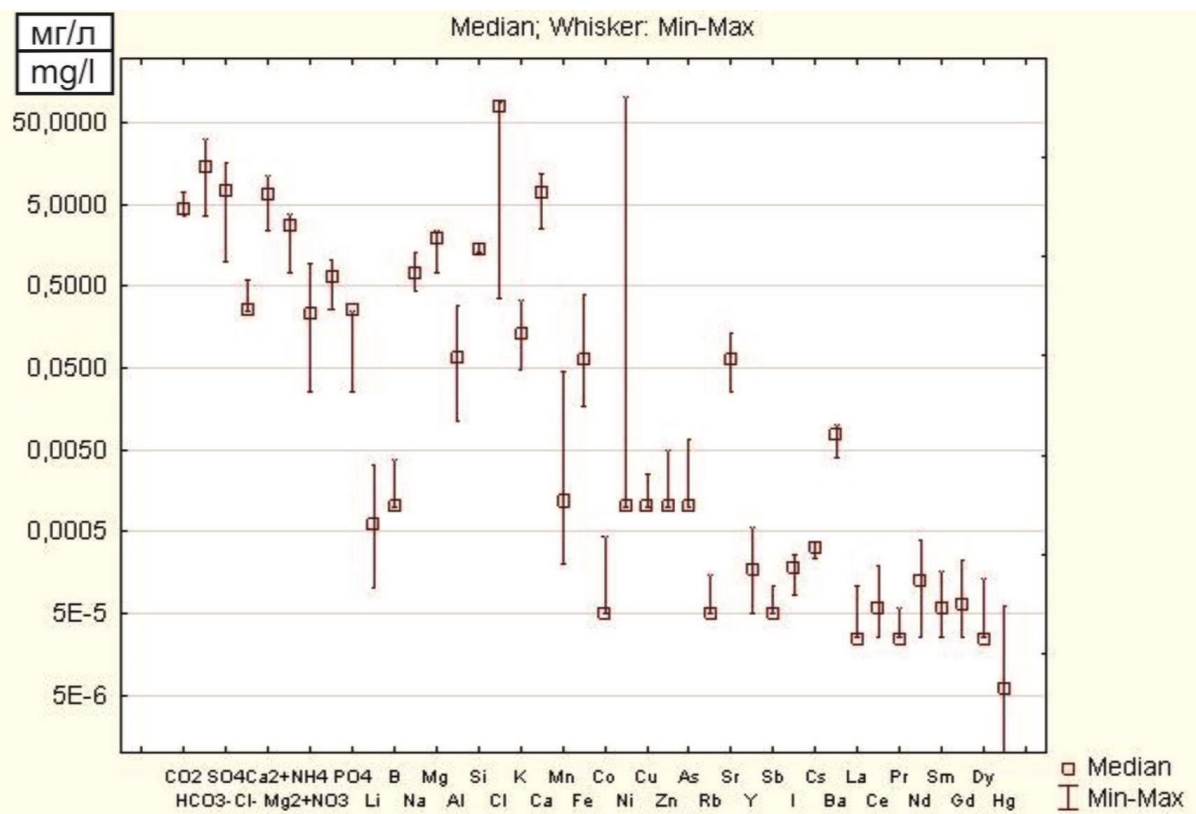


Рис. 3. Диаграмма размаха содержаний изучаемых компонентов в природных поверхностных водах водотоков месторождения Вьюн

Fig. 3. Range of contents values of the studied components in natural surface watercourses of in Vyun deposit

Тип природных поверхностных вод ручьев и рек месторождения по катионной составляющей устойчив – воды являются магниево-кальциевыми с незначительной вариабельностью соотношения ионов кальция и магния.

В табл. 2 представлены характеристики вод водотоков территории месторождения Вьюн, выраженные с помощью формулы Курлова, которая учитывает анионный и катионный состав воды, а также некоторые гидрохимические показатели и является стандартным видом записи информации о природной воде [20].

Повышение балансовой доли сульфат-иона в природных поверхностных водах является следствием контакта вод с участками сульфидной минерализации – зоной локализации рудного тела месторождения, для которой характерна окислительная обстановка. Кроме того, увеличению доли сульфатов в солевом составе рек и ручьев способствует разгрузка подмерзлотных вод в долинах водотоков [3].

Также на изменчивость химического состава поверхностных вод влияет поступление растворимых веществ из атмосферы. По данным В.Н. Макарова [3], для Верхнеиндигирского золотоносного района Якутии характерна средняя минерализация осадков 15 мг/л. Их вклад в привнос солей в поверхностные воды достигает 50 %.

Средние содержания ионов и значений гидрохимических показателей вод водотоков месторождения

Вьюн были сопоставлены с данными М.И. Ксенофоновой [21] о региональных фоновых гидрохимических параметрах бассейна реки Яна, к которому относится речная сеть исследуемой территории. Фоновые данные были получены сотрудниками Северо-Восточного федерального университета (СВФУ) им. М.К. Аммосова в ходе комплексных экологических исследований в бассейне верхнего течения реки Яна в 2015–2017 гг.

Выявлено, что фоновый показатель минерализации, а также pH и жесткость имеют близкие к полученным в ходе данных исследований значениям.

Содержания  $\text{Ca}^{2+}$  (6,93 мг/л),  $\text{Mg}^{2+}$  (2,68 мг/л),  $\text{HCO}_3^-$  (15,4 мг/л) для опробованных водотоков выше, чем региональные фоновые (4,0, 1,7 и 6,7 мг/л соответственно), в то время как фоновые значения содержаний взвешенных веществ (42,2 мг/л), а также  $\text{SO}_4^{2-}$  (15,5 мг/л) существенно превышают средние содержания данных компонентов в водотоках месторождения Вьюн (1,99 и 7,69 мг/л соответственно). Причиной этому могут служить процессы интенсивного поступления минерального вещества в реку Яна и её притоки, в бассейнах которых ведутся горнодобычные работы.

Средние содержания химических элементов в природных поверхностных водах водотоков на территории месторождения Вьюн приведены в табл. 3.

**Таблица 2.** Характеристики природных поверхностных вод водотоков территории золоторудного месторождения Вьюн по гидрохимическим показателям

**Table 2.** Characteristics of natural surface waters of watercourses in the territory of the Vyun gold ore deposit according to hydrochemical parameters

Водоток Watercourse	Число проб Number of samples	Формула Курлова/Характеристика воды Kurlov's formula/Water characteristic
Правый приток ручья Вьюн Right tributary of the Vyun stream	2	$S_{4,3} CO_2 7,0 M_{29} \frac{SO_4 80 HCO_3 20}{Ca 58 Mg 39 Na 3} pH_{6,4} T_{2,7}$
		Ультрапресная, гидрокарбонатно-сульфатная магниевно-кальциевая, слабо кислая, очень мягкая, весьма холодная Ultra-fresh, bicarbonate-sulfate magnesium-calcium, slightly acidic, very soft, very cold
Левый приток ручья Вьюн Left tributary of the Vyun stream	2	$S_{0,8} CO_2 5,3 M_{12} \frac{HCO_3 77 SO_4 23}{Ca 59 Mg 29 Na 12} pH_{7,0} T_{4,0}$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная магниевно-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная Ultra-fresh, sulfate-bicarbonate magnesium-calcium, neutral, very soft, moderately cold
Ручей Вьюн Vyun Stream	6	$S_{0,5} CO_2 4,3 M_{30} \frac{HCO_3 57 SO_4 43}{Ca 56 Mg 38 Na 6} pH_{7,2} T_{5,0}$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная магниевно-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная Ultra-fresh, sulfate-bicarbonate magnesium-calcium, neutral, very soft, moderately cold
Река Бурганджа Burgandja river	3	$S_{0,3} CO_2 4,4 M_{52} \frac{HCO_3 77 SO_4 23}{Ca 60 Mg 33 Na 7} pH_{7,5} T_{8,1}$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная магниевно-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная Ultra-fresh, sulfate-bicarbonate magnesium-calcium, neutral, very soft, moderately cold
Общее для всех водотоков Common to all water-courses	13	$S_{1,5} CO_2 5,3 M_{31} \frac{HCO_3 59 SO_4 41}{Ca 58 Mg 35 Na 7} pH_{7,0} T_{5,0}$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная магниевно-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная Ultra-fresh, sulfate-bicarbonate magnesium-calcium, neutral, very soft, moderately cold

Примечание. *S* – содержание нерастворимых примесей (мг/л); *M* – минерализация (мг/л); *pH* – водородный показатель (ед.); *T* – температура (°C). Содержание *CO*<sub>2</sub> приведено в мг/л; содержания *HCO*<sub>3</sub><sup>-</sup>, *SO*<sub>4</sub><sup>2-</sup>, *Ca*<sup>2+</sup>, *Mg*<sup>2+</sup>, *Na*<sup>+</sup> приведены в мг-экв. %.

Note. *S* is the content of insoluble impurities (mg/l); *M* is the mineralization (mg/l); *pH* – pH value (units pH); *T* is the temperature (°C). *CO*<sub>2</sub> content is given in mg/l; the contents of *HCO*<sub>3</sub><sup>-</sup>, *SO*<sub>4</sub><sup>2-</sup>, *Ca*<sup>2+</sup>, *Mg*<sup>2+</sup>, *Na*<sup>+</sup> are given in mg.-equiv. %.

**Таблица 3.** Средние содержания химических элементов в природных поверхностных водах водотоков на территории месторождения Вьюн

**Table 3.** Average concentrations of chemical elements in natural surface watercourses in the Vyun field

Показатели Indicators	Единицы измерения Units	Значение Value	Показатели Indicators	Единицы измерения Units	Значение Value
Li	мкг/л	0,89±0,27	Rb	мкг/л mcg/l	0,02±0,005
B	mcg/l	0,35±0,08	Sr		<b>71,5±8,7</b>
Na	мг/л	0,79±0,09	Y		0,2±0,05
Mg	mg/l	1,75±0,15	Sb		0,02±0,007
Al	мкг/л mcg/l	83,8±22,3	I		0,18±0,01
Si	мг/л mg/l	1,42±0,03	Cs		<b>0,31±0,01</b>
K		0,17±27	Ba		7,62±0,49
Ca		7,27±0,83	La		0,01±0,004
Mn	мкг/л mcg/l	6,89±4,1	Ce		0,06±0,01
<b>Fe</b>		<b>96,1±33,6</b>	<b>Pr</b>		<b>0,01±0,006</b>
Co		0,06±0,01	<b>Nd</b>		<b>0,15±0,03</b>
Ni		0,64±0,13	<b>Sm</b>		<b>0,05±0,01</b>
Cu		0,37±0,08	<b>Gd</b>		<b>0,07±0,01</b>
Zn		0,69±0,11	<b>Dy</b>		<b>0,02±0,006</b>
As		1,46±0,66	Hg		0,02±0,006
Количество проб/Number of samples					13

Примечание. Содержания *F*, *Be*, *P*, *Sc*, *Ti*, *Cr*, *Ga*, *Ge*, *Se*, *Br*, *Zr*, *Nb*, *Mo*, *Ru*, *Rh*, *Pd*, *Ag*, *Cd*, *In*, *Sn*, *Te*, *Eu*, *Tb*, *Ho*, *Er*, *Tm*, *Yb*, *Lu*, *Hf*, *Ta*, *W*, *Re*, *Os*, *Ir*, *Pt*, *Au*, *Tl*, *Pb*, *Bi*, *Th*, *U* ниже предела обнаружения. Среднее значение ±стандартная ошибка, аномальные значения при расчете средних не учитывались. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов в поверхностных водах водотоков, превышающие кларк речных вод по Виноградову [19].

Note. Contents of *F*, *Be*, *P*, *Sc*, *Ti*, *Cr*, *Ga*, *Ge*, *Se*, *Br*, *Zr*, *Nb*, *Mo*, *Ru*, *Rh*, *Pd*, *Ag*, *Cd*, *In*, *Sn*, *Te*, *Eu*, *Tb*, *Ho*, *Er*, *Tm*, *Yb*, *Lu*, *Hf*, *Ta*, *W*, *Re*, *Os*, *Ir*, *Pt*, *Au*, *Tl*, *Pb*, *Bi*, *Th*, *U* are below the detection limit. Mean value ±standard error, abnormal values were not taken into account when calculating the means. The average concentrations of chemical elements in the surface waters of streams, exceeding the clark of river waters according to Vinogradov [19], are shown in bold.

Статистическая обработка данных дала возможность установить, что наименьшая вариативность концентраций в водах месторождения Вьюн характерна для таких химических элементов, как Si, Ba. При этом наиболее неравномерно распределены содержания Li, Mn, Fe, Co, Ni, Hg.

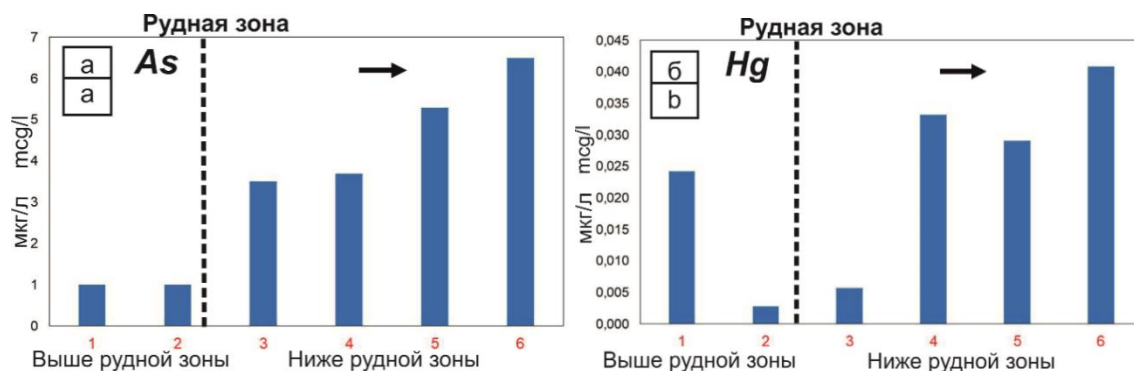
Разброс концентраций химических элементов в пробах природных поверхностных вод показан на диаграмме размаха (рис. 3).

Для месторождения Вьюн важным фактором формирования химического состава природных поверхностных вод водотоков является оруденение, в связи с

чем актуально проведение детальных гидрогеохимических работ, направленных на поиски золоторудной минерализации, ореолов и потоков рассеяния рудных тел. Такого рода работам сейчас уделяется большое внимание как в России [22], так и за рубежом [23, 24].

В рамках данной работы по результатам опробования водотоков установлен факт значительного увеличения концентраций специфических для месторождения химических элементов в воде ручья Вьюн ниже по течению относительно локализации рудной зоны.

Концентрации As ниже рудной зоны возрастают в 4,7 раз (рис. 4, а), Hg – в 4 раза (рис. 4, б).



**Рис. 4.** Содержание As (а) и Hg (б) в воде ручья Вьюн относительно рудной зоны, мкг/л. Цифрами показаны пункты пробоотбора согласно направлению течения. Направление течения обозначено стрелкой

**Fig. 4.** Contents of As (a) and Hg (b) in the watercourses of the Vyun area relative to the ore zone, mcg/l. The numbers show the sampling points according to the direction of flow. The direction of flow is indicated by an arrow

При этом концентрации Hg увеличиваются в воде реки Бурганда после впадения в нее ручья Вьюн, следовательно, можно предполагать, что ручей Вьюн оказывает влияние на химический состав вод реки Бурганда.

Увеличение содержаний As может быть обусловлено непосредственным контактом вод ручья Вьюн с сульфидными минералами мышьяка, например с арсеником (Fe[AsS]), приуроченным к рудной зоне месторождения. Кроме того, нельзя исключать контакт вод с минералами, содержащими в своём составе Hg.

В целом особенностью вод ручья Вьюн являются повышенные относительно средних по месторождению концентрации As, B, Sb и Hg; правого притока ручья Вьюн – Co, Zn, Ni, Cu, Pb, Sb, Ba и некоторых редкоземельных элементов (РЗЭ) (Dy, La, Pr); левого притока ручья Вьюн – Si.

Для установления геохимических особенностей поверхностных вод месторождения Вьюн были рассчитаны кларки концентрации химических элементов относительно кларка речных вод по Виноградову [19]. Сравнение содержаний элементов в воде с кларковыми значениями показано на рис. 5.

На основании данного графика можно говорить о том, что водотоки месторождения Вьюн характеризуются повышенными относительно кларка речных вод концентрациями Gd, Sm, Cs, Dy, Nd, Fe, Sr, Pr, формирующими общую гидрогеохимическую специализацию территории месторождения. Причём среди РЗЭ преобладают те, которые имеют чётные номера в Периодической системе химических элементов

Д.И. Менделеева (Gd, Sm, Dy, Nd), в то время как уровни содержаний РЗЭ под нечётными номерами (Eu, Tb, Ho, Tm, Lu) в исследованных пробах воды находятся ниже предела обнаружения, что является отображением закона Оддо–Гаркина.

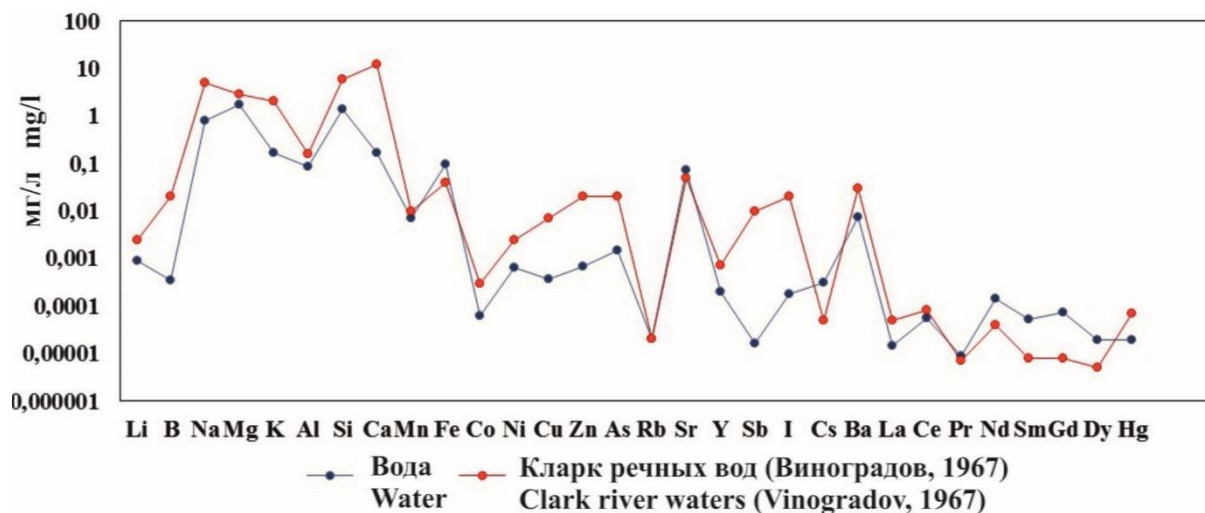
При этом наибольшая средняя концентрация установлена для Nd (0,15 мг/л), а наибольшее превышение кларковых значений – для Gd (кларк концентрации 9,1 ед.).

На данный момент вопрос распространённости и поведения РЗЭ в природных поверхностных водах освещён довольно широко [25–30], при этом мало затрагивается проблема поведения РЗЭ в водах территорий распространения многолетнемерзлых пород [31, 32].

В настоящее время известны три главных источника поступления РЗЭ в природные воды – атмосферные осадки, почвенно-растительный слой и водовмещающие горные породы.

Согласно опубликованным работам [33, 34], главными факторами, определяющими характеристики распределения и величину содержаний редких земель в донных осадках и поверхностных водотоках, являются состав исходных горных пород на территориях водосбора, процессы выветривания и почвообразования [9, 28].

Стоит отметить, что по ходу проведённых нами ранее исследований в составе проб литогенных образований месторождения Вьюн были обнаружены фосфаты РЗЭ, предположительно монацит и ксенотим, которые являются главнейшими минералами редких земель. Данный факт коррелирует с известными данными, представленными выше.



**Рис. 5.** График сравнения средних содержаний химических элементов в природных поверхностных водах водотоков месторождения Вьюн с кларком речных вод по Виноградову [19] (шкала логарифмическая). Содержания F, Be, P, Ti, Cr, Ga, Ge, Se, Br, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Te, Eu, Tb, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U ниже предела обнаружения

**Fig. 5.** Graph of comparison of average contents of chemical elements in natural surface waters of the Vyun deposit with the clark of river waters according to Vinogradov [19] (logarithmic scale). Content of F, Be, P, Ti, Cr, Ga, Ge, Se, Br, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Te, Eu, Tb, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U are below the detection limit

Не менее важную роль в распространённости редких земель в поверхностных водах, вероятно, играет гидрокарбонат-ион, определяющий состав вод зоны гипергенеза месторождения и образующий комплексы с редкоземельными металлами.

Совместное присутствие в ассоциации РЗЭ и железа может быть обусловлено наличием в воде тонкодисперсных гидроксидов Fe, представляющих собой активный сорбент [9]. Способность к комплексообразованию с такого рода сорбентами, а также с глинистыми частицами и органическим веществом, согласно экспериментальным данным [35], убывает в ряду от лёгких РЗЭ к тяжёлым и определяет подвижность лантаноидов в природных процессах [9, 28].

Более наглядно корреляция Fe и редких земель показана ниже.

В целом, касаясь вопроса миграции РЗЭ в поверхностных водах, в том числе в районах с многолетней мерзлотой и ультрапресными природными водами, которые распространены на исследуемой территории, ряд учёных отмечают особую роль органических веществ, на которых происходит перенос РЗЭ [28, 36, 37].

Природа высоких концентраций Cs в поверхностных водах исследуемой территории требует дополнительного изучения. Как известно, природный цезий является моноизотопным элементом и состоит из одного стабильного изотопа Cs<sup>133</sup>. Остальные же изотопы Cs с массовыми числами от 112 до 151 радиоактивны и имеют техногенное происхождение. Некоторые из них являются значимыми загрязнителями окружающей среды при радиационных авариях или ядерных взрывах. Главным образом это Cs<sup>137</sup> с периодом полураспада около 30 лет и Cs<sup>135</sup> с периодом полураспада более 2 млн лет [38].

Также стоит помнить о том, что цезий является химическим аналогом калия [39], что обуславливает его интенсивную аккумуляцию растениями, попадание в пищевые цепи, и тем самым несёт дополнительную опасность для природной среды и человека.

Опасен и радиоактивный стронций, представляющий собой химический аналог кальция [39].

Выделяются четыре природных стабильных изотопа данного химического элемента: Sr<sup>84</sup> (изотопная распространённость составляет 0,56 %), Sr<sup>86</sup> (9,86 %), Sr<sup>87</sup> (7 %), Sr<sup>88</sup> (82,58 %) [38].

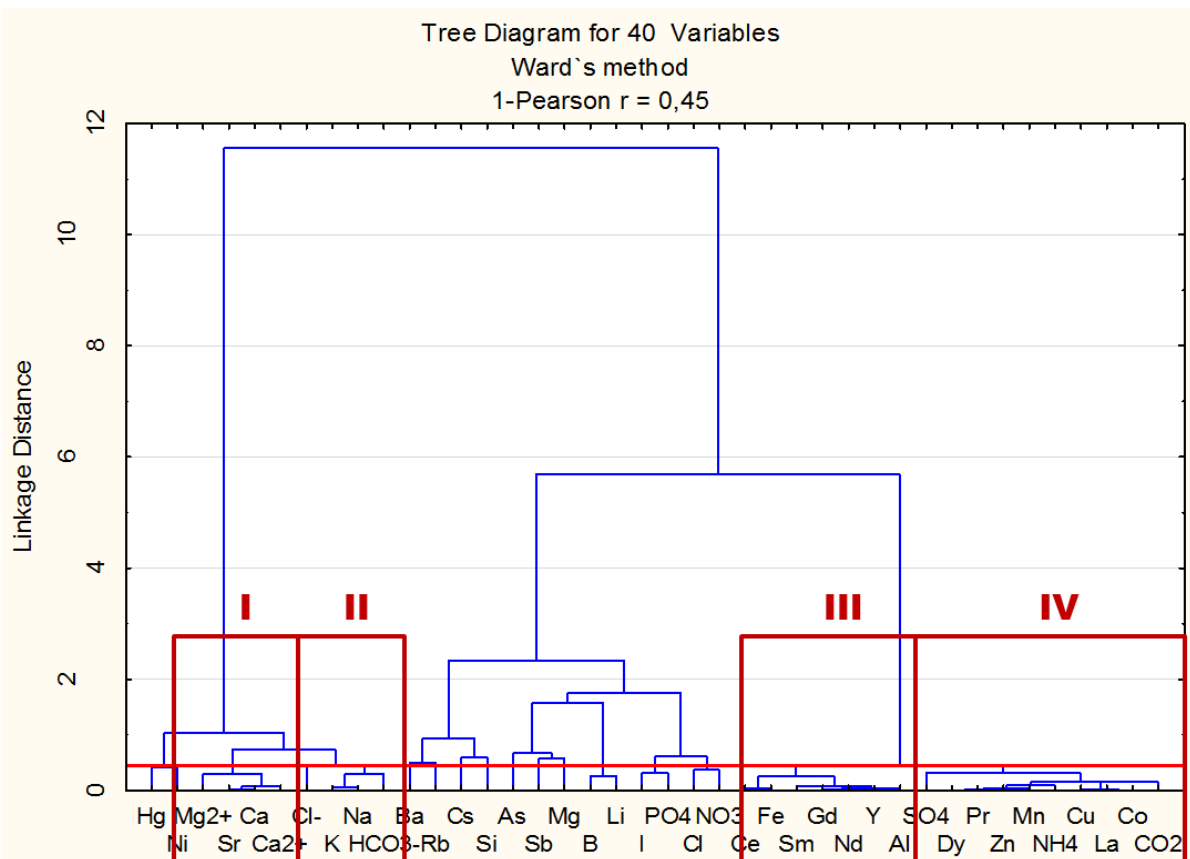
Содержания Sr в исследованных водотоках находятся по большей части на околосларковских уровнях, за исключением вод реки Бурганджа (кларк концентрации Sr составляет 2,4 ед.).

С большой долей уверенности можно утверждать о распространённости в водотоках месторождения Вьюн именно природных изотопов Cs и Sr, т. к. в районе работ и на прилегающих к нему территориях отсутствуют объекты ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), а ядерные взрывы в данной части Республики Саха (Якутия) не проводились.

Сравнивая отдельные ассоциации химических элементов ручья Вьюн, его притоков и реки Бурганджа, можно говорить о значительной их схожести. Наибольшим числом элементов, а также степенью выраженности характеризуется геохимическая специализация правого притока ручья Вьюн, который дренирует рудную зону месторождения. Обращают на себя внимание высокие концентрации Gd, Dy и Sm в водах данного водотока.

Кластеризация данных гидрогеохимического состава природных поверхностных вод водотоков золоторудного месторождения Вьюн позволила сгруппировать отдельные контролируемые показатели и выявить взаимосвязь между ними (рис. 6).





**Рис. 6.** Дендрограмма матрицы корреляционных связей гидрогеохимического состава природных поверхностных вод водотоков золоторудного месторождения Вьюн (количество проб – 13;  $1-r_{0,05}=0,45$ )

**Fig. 6.** Dendrogram of the matrix of correlations of the hydrogeochemical composition of natural surface waters of the Vyun gold deposit (number of samples – 13;  $1-r_{0,05}=0,45$ )

Выделяется несколько кластеров химических элементов. Первые два кластера образуют макроэлементы:  $Mg^{2+}$ , Sr, Ca,  $Ca^{2+}$  и Cl, K, Na, а также гидрокарбонат-ион, определяющий исходный тип природных вод месторождения. Третий, наиболее выделяющийся, кластер формируют Fe, Al и РЗЭ (Ce, Sm, Gd, Nd, Y). В четвёртый кластер объединены сульфат-ион (индикатор контакта вод с зоной сульфидизации), халькофильные элементы (Zn, Cu), Mn, Co, некоторые РЗЭ (Dy, Pr, La), а также  $NH_4^+$  и  $CO_2$ .

Третий и четвёртый кластеры отражают черты геохимической специализации водотоков месторождения.

Выделенные кластеры химических элементов в составе природных поверхностных вод водотоков на территории золоторудного месторождения Вьюн отражают парные коэффициенты корреляции ( $r$ ). Так, например, значимые положительные корреляции (при уровне значимости  $p < 0,05$ ) установлены между содержаниями  $SO_4^{2-}$  с Zn ( $r=0,86$ ), Cu ( $r=0,86$ ), Dy ( $r=0,86$ ), Mn ( $r=0,84$ ), Co ( $r=0,81$ ),  $NH_4^+$  ( $r=0,72$ ),  $CO_2$  ( $r=0,54$ ).

#### Заключение

Таким образом, по результатам гидрогеохимических исследований территории золоторудного месторождения Вьюн (Республика Саха (Якутия)) были определены концентрации широкого спектра химиче-

ских элементов в природных поверхностных водах водотоков на доэксплуатационной стадии освоения месторождения.

Важным результатом, достигнутым по итогу выполнения гидрогеохимических работ, является установление геохимической специфики водных объектов месторождения Вьюн.

В целом для изученных вод характерна ассоциация химических элементов, основу которой составляют РЗЭ, а именно ярко выраженная гадолиний-самарий-диспрозий-неодим-празеодимовая специализация. Причём наблюдается преобладание лёгких редкоземельных элементов цериевой подгруппы.

Кроме того, водотоки месторождения Вьюн характеризуются высокими относительно кларка речных вод по Виноградову [19] уровнями концентрирования Cs, Fe, Sr. Отдельные геохимические ассоциации ручья Вьюн, его притоков и реки Бурганджа схожи между собой и отражают закономерности общей гидрогеохимической специализации.

Стоит заметить, что при проведении геохимических работ в криолитозоне необходимо учитывать специфику условий, в которых происходит перераспределение вещества (влияние низких температур и льда, отсутствие объёмной водной фазы и др. [7]), особенно на территориях, приуроченных к зонам окисления сульфидных месторождений. Вокруг таких объектов в условиях вечной мерзлоты, как правило,

формируются контрастные аномалии сопутствующих оруденению элементов с выраженной сульфатностью [7], что и показано в данной работе.

Установленные средние уровни содержания химических элементов (включая тяжелые металлы, редкие, редкоземельные и радиоактивные химические элементы) в природных поверхностных водах территории месторождения Вьюн являются реперными значениями для последующей хозяйственной деятельности

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребняк Ю.Ф., Чащина Н.М., Щукина Т.М. Химический и бактериальный состав вод ореолов и потоков рассеяния кварц-сульфидного месторождения // Известия АН СССР. Серия: Геология. – 1986. – № 2. – С. 137–139.
2. Погребняк Ю.Ф., Кондратенко Л.А., Лапердина Т.Г. Рудные элементы в водах зоны гипергенеза месторождений Забайкалья. – Новосибирск: Наука, 1989. – 203 с.
3. Макаров В.Н. Геохимия окружающей среды Верхнеиндигирского золоторудного района // Наука и образование. – 2008. – № 4. – С. 45–48.
4. Плюснин А.М., Дабаева В.В. Редкоземельные элементы в рудничных и поровых водах хвостохранилищ Джидинского и Бом-Горхонского ГОКов // XXII Совещание по подземным водам Востока России. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2018. – С. 384–388.
5. Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai-Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 120. – P. 104–119.
6. Modelling of the dissolution and reprecipitation of uranium under oxidising conditions in the zone of shallow groundwater circulation / E.M. Dutova, A.N. Nikitenkov, V.D. Pokrovskiy, D. Banks, B.S. Frengstad, V.P. Parnachev // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 178–179. – P. 63–76.
7. Макаров В.Н. Криогенные геохимические ореолы рассеяния рудных компонентов // Наука и техника в Якутии. – 2010. – № 2. – С. 9–13.
8. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах» / под ред. Е.А. Киселёва. – М.: Минерал-Инфо, 2018. – 369 с.
9. Вареничев А.А., Комогорцев Б.В., Гудзенко В.Т. Основные направления золотодобычи в России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 1. – С. 231–237.
10. Концепция новых центров экономического роста в современных условиях на примере Яно-Кольмской золоторудной провинции / Б.К. Михайлов, А.И. Некрасов, О.В. Петров, С.А. Киммельман, С.Б. Михайлов // Региональная геология и металлогения. – 2010. – № 42. – С. 58–65.
11. Некрасов А.И. Типы геолого-структурных обстановок проявления золото- и сереборудной минерализации в Яно-Кольмской и Западно-Верхоянской провинциях, Северо-Восток Якутии // Руды и металлы. – 2017. – № 1. – С. 5–18.
12. Геохимическая специфика редкоземельных элементов в поверхностных и подземных водах поля Албынского золоторудного месторождения (Амурская область) / В.И. Радомская, С.М. Радомский, Е.Н. Кулик, Л.И. Рогулина, Л.П. Шумилова, Л.М. Павлова // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 6. – С. 648–660.
13. Анисимова Г.С., Протопопов Р.И. Геологическое строение и состав руд золото-кварцевого месторождения Вьюн, Восточная Якутия // Руды и металлы. – 2009. – № 5. – С. 59–69.
14. Карта России. 2015. URL: <https://www.freepng.ru/png-tfycud/> (дата обращения 10.12.2020).
15. Протопопов Р.И., Сулейманов А.М., Пичугин Е.П. Подсчет запасов золоторудного месторождения Вьюн в Верхоянском улусе Республики Саха (Якутия) по состоянию на 01.01.2009, в 3-х книгах. Книга 1. – Якутск, 2009. – 175 с.
16. Экологическая ситуация в России на обзорной карте / Б.И. Кочуров, А.В. Антипова, В.А. Лобковский, С.К. Костовска // Природа. – 2002. – № 12. – С. 51–56.
17. Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю. Геоэкологический мониторинг. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 336 с.
18. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саев, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, А.И. Ачкасов, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, С.Ш. Саркисян, Р.С. Смирнова, Н.Я. Трефилова. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
19. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. – М.: Наука, 1967. – 215 с.
20. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. – М.: Недра, 1996. – 324 с.
21. Ксенофонтowa М.И. Основные гидрохимические параметры поверхностных вод верхнего течения р. Яна // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 5. – С. 123–127.
22. Савичев О.Г. Исследование взаимосвязей между химическим составом вод и донных отложений рек Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 178–188.
23. Noble R.P., Gray D.J. Hydrogeochemistry for mineral exploration in Western Australia (I): methods and equipment // Explore Newsletter. – 2010. – V. 146. – P. 2–11.
24. Robertson I.D.M. Geochemical exploration around the Harmony gold deposit, Peak Hill, Western Australia. Geochemistry // Exploration, Environment, Analysis. – 2001. – V. 4. – P. 113–127.
25. Mineralogy and geochemistry of trace metals and REE in volcanic massive sulfide host rocks, stream sediments, stream waters and acid mine drainage from the Lousal mine area (Iberian Pyrite Belt, Portugal) / E. Ferreira da Silva, I. Bobos, J.X. Matos, C. Patinha, A.P. Reis, E. Cardoso Fonseca // Applied Geochemistry. – 2009. – V. 24 (3). – P. 383–401.
26. Rare earth elements (REE) and yttrium in stream waters, stream sediments, and Fe–Mn oxyhydroxides: fractionation, speciation, and controls over REE+Y patterns in the surface environment / M.I. Leybourne, K.H. Johannesson // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2008. – V. 72 (24). – P. 5962–5983.
27. Biddau R., Cidu R., Frau F. Rare earth elements in waters from the albitite-bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy // Chemical Geology. – 2002. – V. 182 (1). – P. 1–14.
28. Харитоновa Н.А., Вах Е.А. Редкоземельные элементы в поверхностных водах Амурской области. Особенности накопления и фракционирования // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 396. – С. 232–244.
29. Shannon W.M., Wood S.A. The analysis of pictogram quantities of rare earth elements in natural waters // Rare earth elements in groundwater flow system. – 2005. – V. 1. – P. 1–37.
30. Colloidal rare earth elements in a boreal river: changing sources and distributions during the spring flood / K. Andersson, R. Dahlqvist, D. Turner, B. Stolpe, T. Larsson, J. Ingri, P. Andersson // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2006. – V. 70. – P. 3261–3274.
31. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas / M.L. Bagard, F. Chabaux, J. Viers, P. Stille, S. Rihs, A. Schmitt, B. Dupre // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2011. – V. 75 (12). – P. 3335–3357.
32. Transport and transformation of riverine neodymium isotope and rare earth element signatures in high latitude estuaries: a case study from the Laptev Sea / G. Laukert, M. Frank, D. Bauch, E.C. Hathorne, M. Gutjahr, M. Janout, J. Hölemann // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – V. 477. – P. 205–217.
33. Viers J., Dupre B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database // Science of the Total Environment. – 2009. – V. 407. – P. 853–868.

34. Martin J.M., Meybeck M. Elemental mass balance of material carried by world major // *Marine Chemistry*. – 1979. – V. 7 (3). – P. 173–206.
35. Duddy I.R. Redistribution and fractionation of the rare-earth and other elements in a weathering profile // *Chemical Geology*. – 1980. – V. 30. – P. 363–381.
36. Ronnback P., Astroma M., Gustafsson J.P. Comparison of the behaviour of rare earth elements in surface waters, overburden groundwaters and bedrock groundwaters in two granitoidic settings, Eastern Sweden // *Applied Geochemistry*. – 2008. – V. 23 (7). – P. 1862–1880.
37. Competitive binding of REE to humic acid and manganese oxide: Impact of reaction kinetics on development of cerium anomaly and REE adsorption / M. Davranche, O. Pourret, G. Gruau, A. Dia, D. Jin, D. Gaertner // *Chemical Geology*. – 2008. – V. 247 (1). – P. 154–170.
38. Meija J., Berglund M. Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report) // *Pure and Applied Chemistry*. – 2016. – V. 88 (3). – P. 293–306.
39. Гипераккумуляция цезия ряской LEMNA MINOR / Е.В. Платонова, А.В. Карташов, Д.В. Беляев, А.В. Карпычев // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 51–59.

Поступила 13.01.2021 г.

#### Информация об авторах

**Язиков Е.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мишанькин А.Ю.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Осипова Н.А.**, кандидат химических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Филимонок Е.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Карпенко Ю.А.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Собянин Ю.П.**, директор ООО «Богуславец».

UDC 556.114:553.411(571.56)

## GEOCHEMICAL FEATURES OF NATURAL WATERS IN THE VYUN GOLD DEPOSIT (THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA))

**Egor G. Yazikov<sup>1</sup>,**  
yazikoveg@tpu.ru

**Andrey Yu. Mishankin<sup>1</sup>,**  
aym13@tpu.ru

**Nina A. Osipova<sup>1</sup>,**  
osipova@tpu.ru

**Ekaterina A. Filimonenko<sup>1</sup>,**  
filimonenko@tpu.ru

**Yuri A. Karpenko<sup>1</sup>,**  
karpenkoyuriy92@gmail.com

**Yuri P. Sobyandin<sup>2</sup>,**  
yuri\_sob63@mail.ru

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

<sup>2</sup> LLC Boguslavets,  
18, Kirov street, Yakutsk, 677027, Russia.

**The relevance** of the research is justified by the need in data on the state of natural surface waters in the territories of gold mining enterprises located in the permafrost zone of the subarctic belt.

**The purpose** of the research is to identify the geochemical properties of natural waters in the territory of Vyun gold deposit at the stage of pre-production development.

**Object:** surface waters of the Vyun gold deposit.

**Factual materials and research methods.** The factual material was obtained as a result of research work carried out in 2017 by the Department of Geoeology and Geochemistry of National Research Tomsk Polytechnic University. This paper discusses the study of watercourses in the territory of Vyun gold deposit on the basis of 13 water samples taken in the area. The samples were taken and processed using standard methods in accordance with regulation documents. The elemental composition of water was determined in the accredited Problems Research Laboratory of hydrogeochemistry of the Scientific and Educational Center «Voda» of the National Research Tomsk Polytechnic University. Contents of 71 chemical elements were determined by the method of inductively coupled plasma mass spectrometry. A number of methods were used for establishing the hydrochemical characteristics of the waters. More specifically the samples were analyzed by following methods: titrimetric; potentiometric; conductometric; gravimetric; photocolometric; spectrophotometric; by ion chromatographic. The calculation methods and codes developed in Scientific and Educational Center «Voda» were used as well. The results were processed using Microsoft Excel and Statistica. Schemes and diagrams were performed by the graphics editor Corel Draw.

**Results.** The geochemical features of the natural watercourses of the Vyun gold ore deposit area under permafrost conditions were specified. The presence of contrast anomalies of chemical elements represented by arsenic and mercury was established. These elements are satellites of low-sulfide gold quartz mineralization.

### Key words:

Vyun gold ore deposit, surface waters, hydrogeochemical parameters, elemental composition, geochemical features.

### REFERENCES

1. Pogrebnik Yu.F., Chashchina N.M., Shchukina T.M. Khimicheskii i bakterialnyy sostav vod oreolov i potokov rasseyaniya kvartsov-sulfidnogo mestorozhdeniya [Chemical and bacterial composition of the waters of the halos and scattering fluxes of the quartz-sulfide deposit]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya: Geologiya*, 1986, no. 2, pp.137–139.
2. Pogrebnik Yu.F., Kondratenko L.A., Laperdina T.G. *Rudnye elementy v vodakh zony gipergeneznykh mestorozhdeniy Zabaykalya* [Ore elements in the waters of the supergenesis zone of the Transbaikalia deposits]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 203 p.
3. Makarov V.N. Geokhimiya okruzhayushchey sredy Verkhneindigirskogo zolotonosnogo rayona [Geochemistry of the environment of the Verkhneindigirsky gold-bearing region]. *Nauka i obrazovaniye*, 2008, no. 4, pp.45–48.
4. Plyusnin A.M., Dabaeva V.V. Redkozemelnye elementy v rudnichnykh i porovykh vodakh khvostokhranilishch Dzhidinskogo i Bom-Gorkhonskogo GOKov [Rare earth elements in the mine and pore waters of the tailing dumps of the Dzhidinsky and Bom-Gorkhonsky MPP]. *XXII Soveshchaniye po podzemnym vodam Vostoka Rossii* [XXII Meeting on groundwater in the East of Russia]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2018. pp. 384–388.
5. Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai-Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 120, pp. 104–119.
6. Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Pokrovskiy V.D., Banks D., Frengstad B.S., Parnachev V.P. Modelling of the dissolution and reprecipitation of uranium under oxidising conditions in the zone of shallow groundwater circulation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 178–179, pp. 63–76.
7. Makarov V.N. Kriogennye geokhimicheskie oreoly rasseyaniya rudnykh komponentov [Cryogenic geochemical dispersion halos of ore components]. *Nauka i tekhnika v Yakutii*, 2010, no. 2, pp. 9–13.

8. Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrnyevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2016 i 2017 godakh» [The state report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2016 and 2017»]. Ed. by E.A. Kiselev. Moscow, Mineral-Info Publ., 2018. 369 p.
9. Varenichev A.A., Komogortsev B.V., Gudzenko V.T. Osnovnye napravleniya zolotodobychi v Rossii [The main directions of gold mining in Russia]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 1, pp. 231–237.
10. Mikhailov B.K., Nekrasov A.I., Petrov O.V., Kimmelman S.A., Mikhailov S.B. Kontsepsiya novykh tsevtrov ekonomicheskogo rosta v sovremennykh usloviyakh na primere Yano-Kolymy zolotorudnoy provintsii [The concept of new centers of economic growth in modern conditions on the example of the Yano-Kolyma gold ore province]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*, 2010, no. 42, pp. 58–65.
11. Nekrasov A.I. Tipy geologo-strukturnykh obstanovok proyavleniya zoloto- i serebrorudnoy mineralizatsii v Yano-Kolymy i Zapadno-Verkhoyanskoy provintsiyakh, Severo-Vostok Yakutii [Types of geological and structural settings of occurrence of gold and silver ore mineralization in the Yano-Kolyma and West-Verkhoyansk provinces, North-East of Yakutia]. *Rudy i metally*, 2017, no. 1, pp. 5–18.
12. Radomskaya V.I., Radomsky S.M., Kulik E.N., Rogulina L.I., Shumilova L.P., Pavlova L.M. Geokhimicheskaya spetsifika redkozemel'nykh elementov v poverkhnostnykh i podzemnykh vodakh polya Albynskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Amurskaya oblast') [Geochemical specificity of rare earth elements in surface and ground waters of the field of the Albynskoe gold ore deposit (Amur region)]. *Vodnyye resursy*, 2016, vol. 43, no. 6, pp. 648–660.
13. Anisimova G.S., Protopopov R.I. Geologicheskoye stroeniye i sostav rud zoloto-kvartsevoogo mestorozhdeniya Vyun, Vostochnaya Yakutiya [Geological structure and composition of ores of the Vyun gold-quartz deposit, Eastern Yakutia]. *Rudy i metally*, 2009, no. 5, pp. 59–69.
14. *Karta Rossii* [Map of Russia]. 2015. Available at: <https://www.freepng.ru/png-tfycud/> (accessed 10 December 2020).
15. Protopopov R.I., Suleimanov A.M., Pichugin E.P. *Podschet zapasov zolotorudnogo mestorozhdeniya Vyun v Verkhoyanskom uluse Respubliki Sakha (Yakutiya) po sostoyaniyu na 01.01.2009* [Calculation of the reserves of the Vyun gold deposit in the Verkhoyansk ulus of the Sakha Republic (Yakutia) as of 01.01.2009], in 3 books. Book 1. Yakutsk, 2009. 175 p.
16. Kochurov B.I., Antipova A.V., Lobkovskiy V.A., Kostovska S.K. Ekologicheskaya situatsiya v Rossii na obzornoy karte [The ecological situation in Russia on the overview map]. *Priroda*, 2002, no. 12, pp. 51–56.
17. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu. *Geoekologicheskiy monitoring* [Geoeological monitoring]. Tomsk, TPU Publ., 2003. 336 p.
18. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Achkasov A.I., Basharkovich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Sarkisyan S.Sh., Smirnova R.S., Trefilova N.Ya. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
19. Vinogradov A.P. *Vvedeniye v geokhimiyu okeana* [An Introduction to Ocean Geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 215 p.
20. Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1996. 324 p.
21. Ksenofontova M.I. The main hydrochemical parameters of surface waters of the upper reaches of the river Yana. *Problems of regional ecology*, 2018, no. 5, pp. 123–127. In Rus.
22. Savichev O.G. Investigation of the relationship between the chemical composition of waters and bottom sediments of Siberian rivers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 178–188. In Rus.
23. Noble R.P., Gray D.J. Hydrogeochemistry for mineral exploration in Western Australia (I): Methods and equipment. *Explore Newsletter*, 2010, vol. 146, pp. 2–11.
24. Robertson I.D.M. Geochemical exploration around the Harmony gold deposit, Peak Hill, Western Australia. *Geochemistry. Exploration, Environment, Analysis*, 2001, vol. 4, pp. 113–127.
25. Ferreira da Silva E., Bobos I., Matos J.X., Patinha C., Reis A.P., Cardoso Fonseca E. Mineralogy and geochemistry of trace metals and REE in volcanic massive sulfide host rocks, stream sediments, stream waters and acid mine drainage from the Lousal mine area (Iberian Pyrite Belt, Portugal). *Applied Geochemistry*, 2009, vol. 24 (3), pp. 383–401.
26. Leybourne M.I., Johannesson K.H. Rare earth elements (REE) and yttrium in stream waters, stream sediments, and Fe–Mn oxyhydroxides: fractionation, speciation, and controls over REE + Y patterns in the surface environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, vol. 72 (24), pp. 5962–5983.
27. Biddau R., Cidu R., Frau F. Rare earth elements in waters from the albitite-bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy. *Chemical Geology*, 2002, vol. 182 (1), pp. 1–14.
28. Kharitonova N.A., Vakh E.A. Redkozemelnye elementy v poverkhnostnykh vodakh Amurskoy oblasti. Osobennosti nakopleniya i fraktsionirovaniya [Rare earth elements in the surface waters of the Amur region. Features of accumulation and fractionation]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 396, pp. 232–244.
29. Shannon W.M., Wood S.A. The analysis of pictogram quantities of rare earth elements in natural waters. *Rare earth elements in groundwater flow system*, 2005, vol. 1, pp. 1–37.
30. Andersson K., Dahlqvist R., Turner D., Stolpe B., Larsson T., Ingri J., Andersson P. Colloidal rare earth elements in a boreal river: Changing sources and distributions during the spring flood. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, vol. 70, pp. 3261–3274.
31. Bagard M.L., Chabaux F., Viers J., Stille P., Rihs S., Schmitt A., Dupre B. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75 (12), pp. 3335–3357.
32. Laukert G., Frank M., Bauch D., Hathorne E.C., Gutjahr M., Janout M., Hölemann J. Transport and transformation of riverine neodymium isotope and rare earth element signatures in high latitude estuaries: A case study from the Laptev Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol. 477, pp. 205–217.
33. Viers J., Dupre B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database. *Science of the Total Environment*, 2009, vol. 407, pp. 853–868.
34. Martin J.M., Meybeck M. Elemental mass balance of material carried by world major rivers. *Marine Chemistry*, 1979, vol. 7 (3), pp. 173–206.
35. Duddy I.R. Redistribution and fractionation of the rare-earth and other elements in a weathering profile. *Chemical Geology*, 1980, vol. 30, pp. 363–381.
36. Ronnback P., Astroma M., Gustafsson J.P. Comparison of the behaviour of rare earth elements in surface waters, overburden groundwaters and bedrock groundwaters in two granitoid settings, Eastern Sweden. *Applied Geochemistry*, 2008, vol. 23 (7), pp. 1862–1880.
37. Davranche M., Pourret O., Gruau G., Dia A., Jin D., Gaertner D. Competitive binding of REE to humic acid and manganese oxide: Impact of reaction kinetics on development of cerium anomaly and REE adsorption. *Chemical Geology*, 2008, vol. 247 (1), pp. 154–170.
38. Meija J., Berglund M. Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 2016, vol. 88 (3), pp. 293–306.
39. Platonova E.V., Kartashov A.V., Belyaev D.V., Karpychev A.V. Giperakkumulyatsiya tseziya ryaskoy LEMNA MINOR [Hyperaccumulation of cesium with duckweed LEMNA MINOR]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 51–59.

Received: 13 January 2021.

**Information about the authors**

*Egor G. Yazikov*, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Andrey Yu. Mishankin*, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Nina A. Osipova*, Cand. Sc., associated professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Ekaterina A. Filimonenko*, Cand. Sc., associated professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Yuri A. Karpenko*, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Yuri P. Sobyandin*, director, LLC Boguslavets.

УДК 622.691.24

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРОВ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТА УГЛЕВОДОРОДОВ В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ

Китаев Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
svkitaev@mail.ru

Колотилов Юрий Васильевич<sup>2</sup>,  
kolotilov\_yury@mail.ru

Плотников Антон Юрьевич<sup>2</sup>,  
plotnikovyurii@rambler.ru

Ковалев Адель Ахмедович<sup>2</sup>,  
trueenerd123@gmail.com

Шейхгасанов Шамсутдин Кадиевич<sup>1</sup>,  
sheih0113@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>2</sup> Астраханский государственный технический университет,  
Россия, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных методов предотвращения гидратообразования в подводных газопроводах. Быстрому образованию газовых гидратов способствует высокое давление и низкая температура в глубоководных подводных сооружениях, что является одной из наиболее сложных проблем обеспечения работоспособности трубопровода. Основным направлением обеспечения безаварийной работы трубопроводов является поддержка процессов использования ингибиторов гидратообразования при эксплуатации объектов транспорта углеводородного сырья с учетом выделения их достоинств и недостатков.

**Цель:** разработка метода оценки эффективности ингибиторов гидратообразования в процессе добычи и транспорта углеводородов в морских условиях.

**Объекты:** эксплуатационные показатели реализации методов использования ингибиторов гидратообразования с оценкой риска, связанного с образованием гидратов, которая помогает предотвратить закупорку гидратов и обеспечить целостность оборудования.

**Методы.** Для повышения достоверности интерпретации методов применения ингибиторов гидратообразования предлагается использовать программное обеспечение OLGA, которое представляет собой инструмент моделирования анализа перекачки нефти, природного газа и пластовой воды при многофазной транспортировке. Этот инструмент моделирования позволяет визуализировать ключевые аспекты динамических событий, отражающих реальность транспортировки углеводородов. Пакет программ OLGA позволил разрабатывать месторождения нефти и газа в более глубоких водах и дальше от берега, чем это было бы возможно без этой технологии.

**Результаты.** Использование программного обеспечения OLGA позволило рассмотреть существующие методы предотвращения гидратообразования и сделать вывод о том, что технология холодного потока, а также добавление 10%-го раствора метанола являются наиболее выгодным решением для Арктики по сравнению с другими технологиями и другими концентрациями соответственно.

### Ключевые слова:

Морской трубопровод, ингибитор, гидратообразование, программное обеспечение, концентрация, давление, температура.

### Введение

Обеспечение потока – один из самых важных аспектов в нефтяной и газовой промышленности и служит целью того, что сырая нефть и природный газ транспортируются экономно с месторождения на установки подготовки. В основном углеводороды транспортируются от места добычи до береговых или морских мест подготовки посредством трубопроводов и часто бывает так, что течение в трубопроводах многофазное. В дополнение к этому гидраты (подобная льду структура, где газовая молекула заключена в ячейку молекулы воды) часто формируются в трубопроводах и закрывают проходное сечение, замедляя добычу, и приводят к дорогостоящим операциям по ремонту.

При благоприятных условиях газовые гидраты могут образовываться в добывающих скважинах, в сборных промысловых трубопроводах и коллекторах, в магистральных газотранспортных системах, в трубопроводах установок предварительной подготовки и переработки газа [1–3].

Закупорка трубопровода – одна из основных проблем в нефтегазовой промышленности, так как это приводит к дорогостоящему ремонту. Хотя термодинамика гидратов была изучена в течение многих десятилетий, исследование переходного характера образования гидратов в трубопроводах довольно новое и его начали проводить относительно недавно. Во избежание формирования гидратов и для обеспечения потока выбираются специальные методы.

Образование газогидратов в подводных магистральных трубопроводах является основной проблемой обеспечения потока в глубоководных трубопроводах и указывается в качестве основной технической проблемы в развитии морской энергетики. Обычно образование газогидратов в нефте- и газопроводах предотвращается введением большого количества ингибиторов, таких как метанол или гликоли [4–6]. Как альтернатива, образование газовых гидратов можно контролировать, используя небольшие количества полимерных соединений (кинетические ингибиторы), которые вместо ингибирования образования работают термодинамически, замедляя скорость формирования газовых гидратов.

Однако использование кинетических ингибиторов гидратов требует детальных знаний о зародышеобразовании и росте газовых гидратов и о том, как на эти процессы влияют давление и температура по отношению к фазовым равновесиям.

Большинство существующих методов обеспечения потока газа направлены:

- 1) на поддержание условий эксплуатации трубопровода за пределами зоны стабильности гидрата (например, изоляцией или дистанционным нагревом) [7–9];
- 2) предотвращение образования гидратов путем введения термодинамических ингибиторов (например, метанола или этиленгликоля) [10, 11];
- 3) достаточную задержку зарождения или роста гидрата путем введения кинетических ингибиторов гидратообразования [12–14];
- 4) снижение содержания воды [15–17].

Однако все эти способы становятся менее практичными из-за их высокой стоимости или ограничения, особенно в глубоких водах и при больших объемах. Поэтому отрасль переходит к управлению образованием гидратов. Таким методом является Cold Flow [18, 19], то есть холодный поток, который имеет несколько общих идей, таких как отсутствие нагрева или изоляции, гидраты не предотвращаются, но могут образовываться.

Гидраты, как правило, образуются в трубопроводах с природным газом при наличии воды и благоприятных условиях температуры и давления, как правило, при низких температурах и соответствующих высоких давлениях. Агломерация гидратов [20–22] может привести к блокировке трубопроводов и оборудования [16]. Следовательно, требуется тщательная оценка риска, связанного с образованием гидратов, которая помогает предотвратить закупорку гидратов и обеспечить целостность оборудования.

#### **Проблемы обеспечения потока во время добычи или транспорта углеводородов**

Обеспечение потока – это очень важная часть, которая гарантирует достижение требуемых показателей жизненного цикла системы от призабойной зоны к разгрузочным резервуарам путем прогнозирования, предотвращения и решения проблем, возникающих в результате поведения транспортируемых веществ (газов, жидкостей в разделенных либо в многофазных условиях).

Акцент на обеспечение потока имеет некоторые физические границы. Несомненно, всякий раз, когда поток из пласта ограничен, нормальное обеспечение потока начинает становиться проблемой. Это может происходить в трубах любого типа (например, в скважинных трубопроводах, отводных трубопроводах или транспортных трубопроводах). Общим для всех этих мест является то, что даже крошечные превращения, производимые жидкостями, могут оказывать сильное влияние на работоспособность и отличаться от желаемого потока.

Углеводороды присутствуют либо в парообразной, либо в жидкой форме (или в обеих), но также будут присутствовать пластовая вода, вода для закачки, песок, продукты коррозии, строительный мусор, асфальтены, частицы и другие компоненты [23].

На мелководье или на суше получить доступ к стволу скважины и трубопроводам проще. По мере того как операторы перемещаются в более отдаленные районы, на более глубокие морские глубины, они сталкиваются с трудностями в поддержании потока добываемых жидкостей и газа. Глубоководные стволы скважин и трубопроводы более сложны для доступа и представляют большую сложность в избежании или предотвращении закупорки.

Наиболее важной технической проблемой, с которой сейчас сталкивается нефтяная промышленность, является обеспечение потока. В рамках обеспечения потока проблемы с гидратами газа представляют собой наиболее серьезную угрозу для транспортировки нефти и газа по трубопроводам. Скопления гидратов, которые закупоривают трубопроводы, могут нарушить нормальные производственные графики и привести к экономическим потерям или даже создать риск безопасности, если не будут должным образом предупреждены или предотвращены. Проблема гидратов в трубопроводах обходится в миллиарды долларов для газопроводов.

Чтобы определить условия потока для образования гидрата, нам нужно рассчитать давление и температуру вдоль трубопровода, изучая динамику жидкости и тепломассопереноса. Оценка падения давления в трубопроводе играет важную роль в проектировании трубопровода и гарантирует бесперебойную транспортировку продукта.

Формирование гидратных пробок в трубопроводе занимает всего несколько часов [24] и приводит к нарушению технологического процесса. Очень важно распознать образование гидратных пробок, прежде чем ситуация ухудшится. Как правило, программные данные показывают, что в трубопроводе есть колебания давления до образования гидратной пробки. Пики на кривой давления и времени предупреждают о сильном отложении гидрата на стенке трубопровода.

Теоретически, если вся вода будет удалена из потока природного газа, условия для образования гидрата не будут выполняться. Оффшорное обезвоживание может быть неосуществимым для операций из-за физических ограничений на производственный объект на морских объектах. Также может не быть необходимости иметь морскую установку для обезвожи-



вания, если стояки внизу морского дна не имеют крутых склонов, но температура и давление в трубопроводе так же важны, как и наклон райзера. При этом обезвоживающие сооружения не являются наиболее экономически эффективным способом предотвращения образования гидратов в подводных транспортных трубопроводах.

С точки зрения эксплуатации, если поддерживать параметры потока за пределами кривой гидратного равновесия, это также предотвратит гидратообразование. Для достижения этих условий могут быть применены термодинамические, кинетические ингибиторы и тепловые методы. Управление кривой гидратообразования может быть достигнуто путем введения ингибиторов в трубопровод. Некоторые термические методы используются для того, чтобы обеспечить безвредное для окружающей среды управление кривой гидратообразования без подачи химикатов в трубопровод.

Традиционные способы обеспечения потока газа – это удаление элементов, которые способствуют образованию гидрата. Гидратообразования можно избежать путем гидратации, которое уменьшает количество воды, доступной для образования гидрата, или путем поддержания рабочего давления и температуры вне области образования гидрата. Последний метод основан на смещении гидратной фазовой границы за пределы рабочих условий (давление и температура) во время нормальной добычи или транспорта. Этого можно достичь, сдвинув гидратную фазовую границу системы влево, добавив химические соединения, такие как термодинамические ингибиторы, сместив рабочую линию вправо, нагревая или изолируя трубопровод. Также возможно сместить рабочую линию за пределы зоны стабильности гидрата, контролируя рабочее давление (хотя этот параметр обычно используется для диссоциации гидратной пробки путем сброса давления).

Существуют различные методы обеспечения потока для решения проблемы образования гидратов в трубопроводах. Некоторые методы связаны с предотвращением образования гидратов, в то время как новая тенденция заключается в том, чтобы допускать образование гидратов, но предотвращать образование гидратной пробки.

#### **Добавление ингибиторов гидратов в систему**

Современные решения для предотвращения образования гидратов в основном осуществляются с помощью термодинамических средств, то есть поддержания температуры и давления на безопасном уровне и удаления воды, или путем введения 10÷50 % объема термодинамических ингибиторов, таких как моноэтиленгликоль, в жидкость. В дополнение к термодинамическим ингибиторам в последнее десятилетие были разработаны новые методы, такие как кинетические ингибиторы и антиагломеранты, чтобы предотвратить рост кристаллов гидратов и их агломерацию соответственно. В этом методе полимеры и поверхностно-активные вещества добавляются в по-

ток в трубопроводах, образуя эмульсии (вода-в-масле) или микроэмульсии.

Для минимизации риска образования гидратов обычной практикой является использование избыточного количества ингибитора. Чрезмерная дозировка ингибитора приводит к негативным воздействиям на окружающую среду и нежелательным дополнительным расходам. По этой причине необходимость минимизировать количество ингибиторов является еще одной мотивацией для продолжения исследований по определению механизма гидратообразования.

Наиболее распространенным методом для предупреждения гидратов, применяемым в промышленности в настоящее время, является применение ингибиторов.

Разработка экономически эффективных альтернативных и экологически приемлемых ингибиторов гидратов является технологической проблемой для нефтегазовой отрасли. Ингибиторы добавляются в технологические линии для подавления образования гидратов. Впрыск химиката используется для трубопроводов протяженностью от 10 до 250 км.

Существуют две основные категории химических ингибиторов: термодинамические и низкодозированные ингибиторы гидратов.

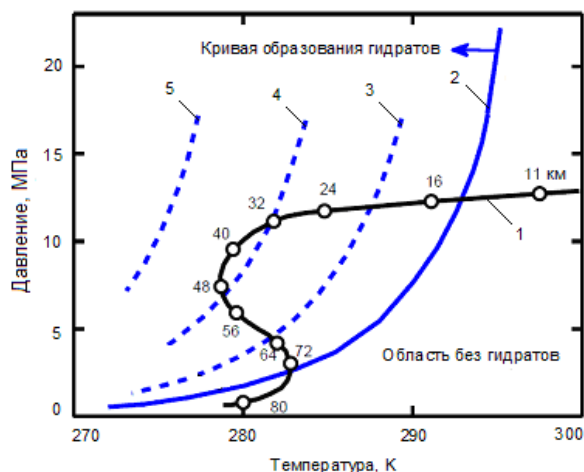
Образование гидратов является серьезной проблемой для промышленности. Специалисты по обеспечению потока находились в поиске решений этой проблемы с момента разработки первых морских месторождений. Одно из первоначальных решений, которые до сих пор используются сегодня, это ввод химических веществ, называемых термодинамическими ингибиторами. Ингибиторы обычно представляют собой полярные растворители или ионные соли, которые не предотвращают образование гидратов, но вместо этого они снижают температуру пласта или увеличивают пластовое давление (т. е. изменяют фазовую оболочку, внутри которой гидрат стабилен).

Таким образом, они предотвращают попадание углеводородной жидкости в зону стабильности гидрата по всей длине трубопровода. Наиболее часто используемые термодинамические ингибиторы представляют собой метанол и этиленгликоль (МЭГ). Они добавляются в высоких концентрациях 10÷60 мас. % и изменяют свойства жидкой и гидратной фаз, что позволяет сместить кривую диссоциации в область низких температур и высоких давлений.

Были проведены исследования образования гидратов (рис. 1). Справа от диаграммы гидраты не будут образовываться и система будет существовать в области флюидов (углеводородов и воды). Однако гидраты образуются в регионе слева от линии, обозначенной «Кривая образования гидратов», и следует принять меры по предотвращению их образования.

Эти условия показаны в виде почти горизонтальной линии, наложенной на условия образования гидратов, на рис. 1. На небольших расстояниях трубопровода (например, 11 км) от подводного устья скважины транспортируемый поток все еще сохраняет некоторое количество пластового тепла, так что гид-

рат не образуется. Океан охлаждает протекающий поток, и примерно через 15 км единичная масса протекающего газа и попутной воды поступает в гидратную область слева от кривой образования гидрата, оставаясь в свободной области гидрата до 72 км. Такое расстояние может представлять несколько дней пребывания в водной фазе, так что гидраты, несомненно, будут образовываться, если не будут приняты шаги по ингибированию.



**Рис. 1.** Образование гидратов в трубопроводе: 1 – схема прокладки трубопровода; 2–5 – концентрация метанола, соответственно,  $Me_2=0\%$ ,  $Me_3=10\%$ ,  $Me_4=20\%$  и  $Me_5=30\%$

**Fig. 1.** Formation of hydrates in the pipeline: 1 – pipeline scheme; 2–5 – methanol concentration, respectively,  $Me_2=0\%$ ,  $Me_3=10\%$ ,  $Me_4=20\%$  and  $Me_5=30\%$

На рис. 1 на 40 км температура системы трубопровода находится в пределах нескольких градусов от температуры дна океана, так что примерно 23 мас. % метанола требуется в фазе свободной воды для предотвращения образования гидратов и закупорки трубопроводов. Оборудование для закачки метанола недоступно в необходимых точках (от 15 до 72 км) вдоль трубопровода. Вместо этого метанол закачивается в трубопровод на подводном устье скважины. В случае трубопровода, показанного на рис. 1, достаточное количество метанола впрыскивается в устье скважины так, что в фазе свободной воды будет присутствовать избыток 23 мас. % метанола по всей длине трубопровода. Концентрация метанола более 20 % требуется для полного подавления образования гидратов в этой системе.

Когда испаренный метанол течет по трубопроводу, он растворяется в любой попутной воде или в воде, конденсированной из газа. Ингибирование гидрата происходит в свободной воде, обычно в скоплениях, где есть изменение в геометрии (например, изгиб или падение трубопровода вдоль впадины дна океана) или в некотором месте зародышеобразования (например, песок или сварной шов).

Ингибирование гидратов происходит в водной жидкости, а не в объеме паров. Хотя большая часть метанола растворяется в воде, значительное количество метанола либо остается в паре, либо растворяет-

ся в жидкой углеводородной фазе. Даже если концентрация метанола в парах или жидких углеводородах мала, при небольших количествах воды большая часть метанола может потребляться паром или жидкими углеводородами, поскольку фракции углеводородной фазы намного больше, чем фракции водной фазы.

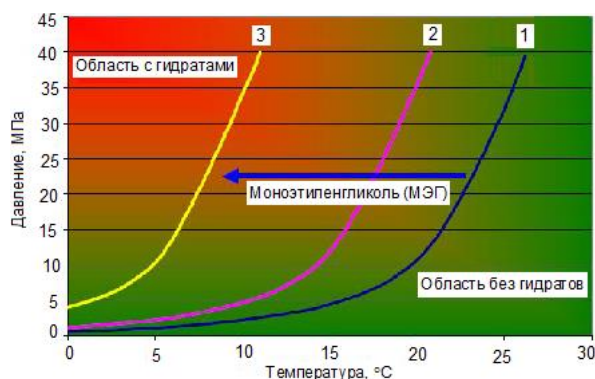
На рис. 1 показано, что температура газа увеличивается с 48 до 72 км с более теплыми (более мелкими) водными условиями. Однако на расстоянии от 72 до 80 км наблюдается вторая тенденция охлаждения из-за эффекта расширения Джоуля–Томсона.

Термодинамические ингибиторы гидратов давно используются в промышленности и действуют как антифриз. Наиболее часто используемые – это метанол и моноэтиленгликоль.

Основной принцип использования термодинамических ингибиторов заключается в том, что он предотвращает образование гидратов путем смещения условий равновесия, при этом условия образования гидратов обеспечиваются при более низких температурах и повышенном давлении.

Таким образом, добавление метанола или моноэтиленгликоля смещает кривую равновесия влево, где достигается термодинамическое равновесие молекул жидкости и газа. В этом случае образование гидратов происходит при более низкой температуре и более высоком давлении, за счет этого снижается риск образования гидратов.

Они только изменяют условия температуры и давления, тем самым смещая рабочие условия из стабильной гидратной области, как показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Кривая равновесия гидрата газа: 1–3 – концентрация моноэтиленгликоля (МЭГ), соответственно,  $MEG_1=0\%$ ,  $MEG_2=20\%$  и  $MEG_3=40\%$

**Fig. 2.** Equilibrium curve of gas hydrate: 1–3 – the concentration of monoethylene glycol (MEG), respectively,  $MEG_1=0\%$ ,  $MEG_2=20\%$  and  $MEG_3=40\%$

Стратегия управления гидратами с использованием химикатов основана на непрерывном введении термодинамического ингибитора гидратов (как правило, моноэтиленгликоля) практически без изоляции подводной системы. Термодинамические ингибиторы редко используются в нефтяных системах, потому что для предотвращения гидратации потребуются высокие концентрации. Химикаты доставляются по трубопроводу малого диаметра в направлении,

противоположном производственному потоку, из стационарных резервуаров на морском дне или на поверхности.

Ингибиторы обычно используются, когда обводненность в системе находится в диапазоне от 20 до 40 % массы, но теоретически она может использоваться при всех обводнениях. Эффект переохлаждения метанола может достигать примерно 30 °С для 50 % массы при давлениях от 0 до 17 МПа. Вязкость нефти всегда зависит от добавления ингибитора. При добавлении метанола полученная нефть будет более густой, а гликоля – более тонкой, но это сложно предсказать. Однако количество гидрата до 40 % не обязательно дает измеримое изменение вязкости жидкости.

Гликоли широко используются в нефтегазовой промышленности, особенно при добыче природного газа. Когда моноэтиленгликоли используются в качестве ингибиторов газовых гидратов, их потеря в углеводородной фазе является наиболее существенным недостатком, особенно для метанола. Моноэтиленгликоли более предпочтительны, потому что их легче регенерировать: температура кипения моноэтиленгликоля выше, чем у метанола и потери на испарение незначительны.

Стратегия уменьшения гидратов основана на непрерывном введении термодинамического ингибито-

ра гидратов (обычно моноэтиленгликоля) с небольшой изоляцией или без изоляции подводной системы. Сегодня моноэтиленгликоль представляет собой современный метод контроля гидратов. У них также, помимо предотвращения гидратов, МЭГ снижает скорость коррозии в трубопроводах из углеродистой стали, которые обычно используются, и хорошо подходит в качестве носителя ингибиторов коррозии и стабилизаторов pH. Моноэтиленгликоль также считается регенерируемым и экологически чистым из-за своих химических свойств и использования в замкнутой системе, где потери относительно невелики.

Кроме того, эффективное содержание ингибитора составляет менее 6 % от подлежащего обработке газа. Системы регенерации обычно используются для кипячения воды в условиях, близких к атмосферному давлению. Рабочая температура зависит от необходимого содержания МЭГ. Метанол обычно не регенерируется.

Основные преимущества МЭГ включают в себя: надежное решение; замкнутый цикл; защита от коррозии; экологически чистый, нетоксичный, негорючий.

Краткое изложение преимуществ и ограничений при использовании химических ингибиторов для предотвращения гидратообразования представлено на рис. 3.

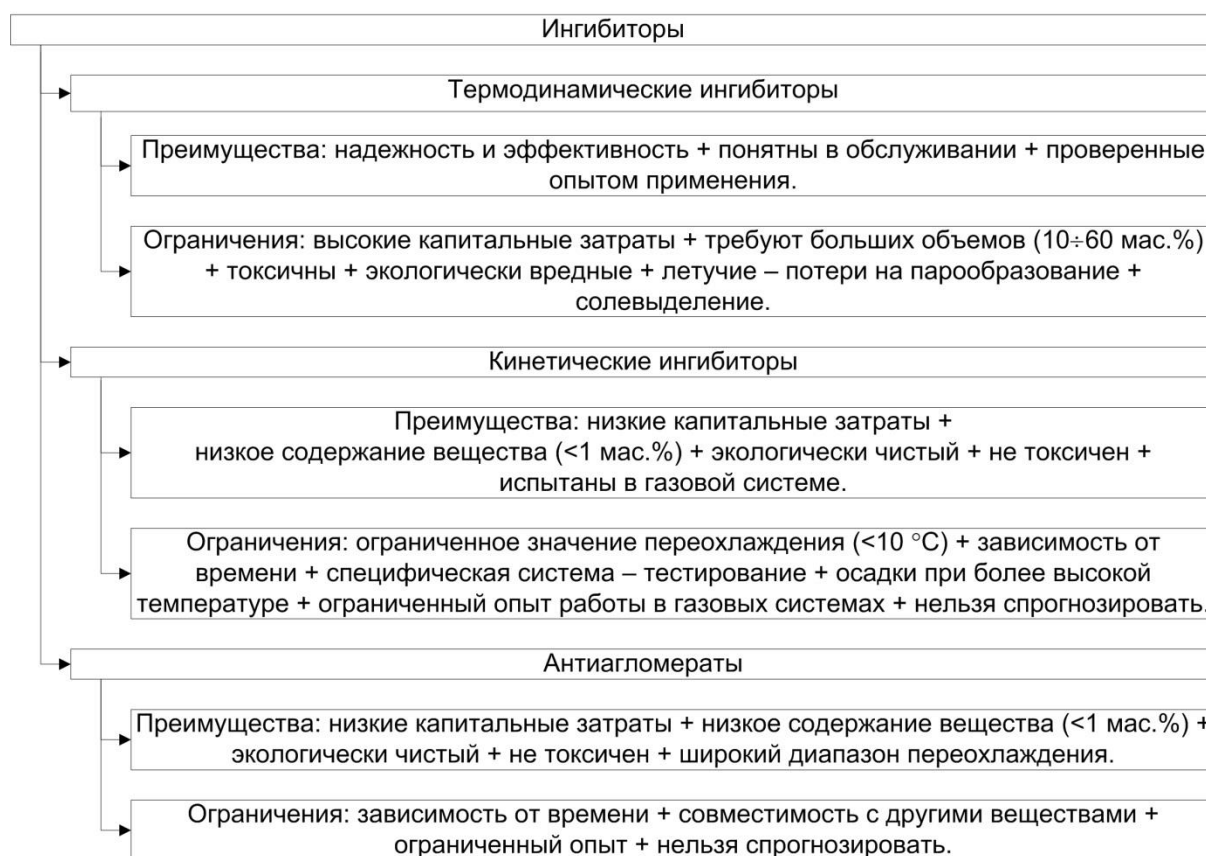


Рис. 3. Описание преимуществ и ограничений химических ингибиторов

Fig. 3. Description of the benefits and limitations of chemical inhibitors

### Программное обеспечение OLGA

Существующее программное обеспечение [25–27] позволяет моделировать технологический процесс использования химических ингибиторов для предотвращения гидратообразования.

Программное обеспечение OLGA позволяет произвести анализ показателей перекачки нефти, природного газа и пластовой воды при многофазной транспортировке. Этот инструмент моделирования позволяет визуализировать ключевые аспекты динамических событий, отражающих реальность транспортировки углеводородов. Пакет OLGA позволил разрабатывать месторождения нефти и газа в более глубоких водах и дальше от берега, чем это было бы возможно без этой технологии.

Газовые гидраты вызывают серьезные и потенциально опасные проблемы обеспечения потока в производственных операциях. Типичная проблемная область – это многофазные транспортные линии от устья скважины к производственному объекту, где низкие температуры морского дна и высокое рабочее давление увеличивают риск засорения из-за образования гидрата газа.

Программное обеспечение OLGA позволяет прогнозировать риск образования гидратов и обеспечивает рабочий диапазон для предотвращения образования гидратов при транспортировке в скважину, на технологических объектах и при проектных вмешательствах в случае образования твердых образований.

Типичные случаи использования: предотвращение появления гидратов и оценка количества образовавшихся гидратов; использование гидратной суспензии; моделирование гидратной суспензии.

Газовый конденсат и вода при благоприятных условиях образуют гидратную пробку, которая закупоривает трубопровод. В морских трубопроводных системах при высоких давлениях и температурах очень часто создаются условия, при которых имеется высокая вероятность образования гидратов. Образовавшийся гидрат, представляющий собой по свойствам лед, невозможно удалить за короткое время, из-за этого происходит снижение пропускной способности трубопровода или полная остановка транспортировки продукта.

Борьба с гидратообразованием – это закачка термодинамических ингибиторов, таких как метанол, моноэтиленгликоль, диэтиленгликоль и триэтиленгликоль. Ввиду того, что последние два представителя не обладают достаточной эффективностью, здесь будем рассматривать метанол (Me) и моноэтиленгликоль (МЭГ).

Рассмотрим воздействие 20 %-го раствора метанола на поток. На рис. 4 получили сдвиг кривой гидратообразования от первоначального положения, где не было никакого воздействия на систему.

Теперь уменьшим содержание метанола в растворе до 10 % и посмотрим, как будет вести себя кривая образования гидратов. Даже в случае с 10%-м раствором метанола видим, что гидраты еще не образуются. Теперь смоделируем ситуацию с 5%-м раствором (рис. 4) и убедимся в обратном.

Проводя подобные операции с разными концентрациями метанола, в итоге можем получить вполне ожидаемый результат: чем больше концентрация, тем больше линия смещается влево (рис. 4).

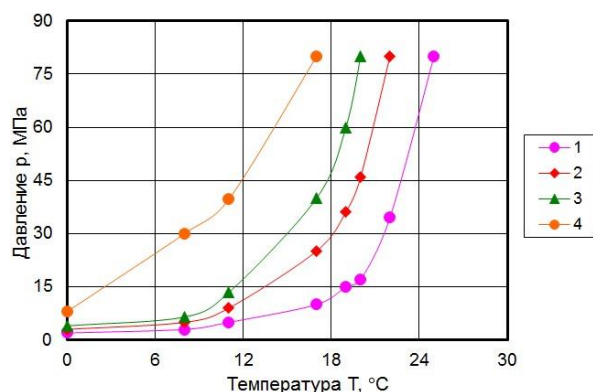


Рис. 4. Кривые гидратообразования при различных концентрациях метанола (Me): 1 – без ингибиторов, концентрация метанола  $Me_1=0$  %; 2 – концентрация метанола  $Me_2=10$  %; 3 – концентрация метанола  $Me_3=20$  %; 4 – концентрация метанола  $Me_4=25$  %

Fig. 4. Hydrate formation curves at various concentrations of methanol (Me): 1 – without inhibitors, methanol concentration  $Me_1=0$  %; 2 – methanol concentration  $Me_2=10$  %; 3 – methanol concentration  $Me_3=20$  %; 4 – methanol concentration  $Me_4=25$  %

Аналогичные кривые гидратообразования можно получить в программе OLGA при различных концентрациях моноэтиленгликоля (рис. 5).

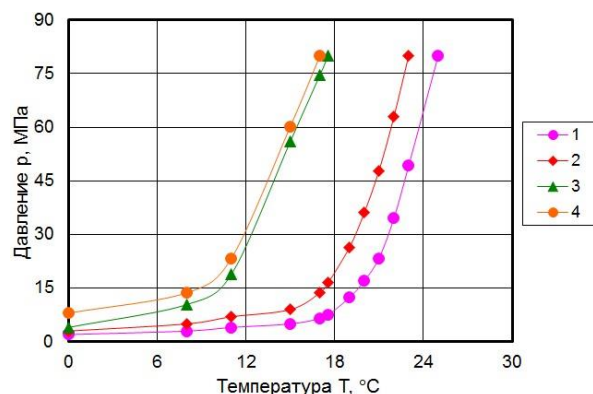


Рис. 5. Кривые гидратообразования при различных концентрациях моноэтиленгликоля (МЭГ): 1 – без ингибиторов, концентрация моноэтиленгликоль  $MEG_1=0$  %; 2 – концентрация  $MEG_2=10$  %; 3 – концентрация  $MEG_3=20$  %; 4 – концентрация  $MEG_4=25$  %

Fig. 5. Hydrate formation curves at various concentrations of monoethylene glycol (MEG): 1 – without inhibitors, the concentration of monoethylene glycol  $MEG_1=0$  %; 2 – concentration of  $MEG_2=10$  %; 3 – concentration of  $MEG_3=20$  %; 4 – concentration of  $MEG_4=25$  %

Рассмотренный метод предотвращения газовых гидратов – закачка термодинамических ингибиторов, применялся для разработки месторождения в Арктике. Бы-

ло установлено, что оптимальное решение для борьбы с гидратами – это закачка термодинамических ингибиторов, таких как метанол или моноэтиленгликоль.

### Заключение

Разработка запасов арктического шельфа является одной из перспективных областей, через которые можно вести добычу нефти и газа. Арктический шельф может стать важным источником долгосрочного роста добычи. Однако сложные ледовые и погодные условия и отсутствие инфраструктуры требуют другого подхода и технологий.

Добыча газа в Арктике связана с необходимостью транспортировки углеводорода на большие расстояния, в результате чего транспортируемый природный газ и вода образуют газовые гидраты. Образование гидрата с последующим накоплением создает большие агломерации. В результате это приводит к огра-

ничению и блокировке трубопровода. Ясно, что они будут препятствовать потоку углеводородов. Чтобы избежать этого, все больше и больше внимания уделяется разработке методов обеспечения потока, чтобы предотвратить образование гидратных пробок.

Математическое моделирование (использование программного комплекса OLGA) позволяет прогнозировать риск образования гидратов и обеспечивает рабочий диапазон для предотвращения образования гидратов при транспортировке в скважину, на технологических объектах и при проектных вмешательствах в случае образования твердых образований.

Установлена эффективность добавления 10 %-го раствора метанола для предотвращения гидратообразования как наиболее выгодное решение для Арктики по сравнению с другими технологиями и другими концентрациями соответственно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А.В., Римский-Корсаков Н.А., Лискин В.А. Методы и средства обнаружения и исследования газовых гидратов // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019). – М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2019. – С. 192–195.
2. Рябов А.Д. Современный подход к образованию газовых гидратов: прогнозирование, методы предупреждения и борьбы // Проблемы геологии и освоения недр. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 166–168.
3. Ширококов О.С., Свалова М.В. Газовые гидраты в газопроводах природного газа // Актуальные проблемы современной когнитивной науки. – Уфа: Аэтерна, 2019. – С. 15–20.
4. Бухгалтер Э.Б. Метанол и его использование в газовой промышленности. – М: Недра, 1986. – 283 с.
5. Истомин В.А. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах сбора и промысловой обработки газа и нефти. – М.: ВНИИГАЗ, 1990. – 213 с.
6. Бухгалтер Э.Б., Ильякова Е.Е. Нормативные аспекты экологического мониторинга при морской нефтегазодобыче в Арктике // Вести газовой науки. – 2013. – № 2 (13). – С. 82–87.
7. Волков П.В. Выбор способа при теплофизическом воздействии для предотвращения гидратообразования при подготовке газа и конденсата // Проблемы геологии и освоения недр. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – Т. 1. – С. 74–75.
8. Перспективы применения технологий хранения и транспортировки углеводородного сырья на основе газовых гидратов в условиях Арктики / М.Е. Семенов, А.С. Портнягин, В.В. Корякина, И.К. Иванова // Теплофизика и энергетика арктических и субарктических территорий. – М.: Национальный исследовательский университет МЭИ, 2019. – С. 246–251.
9. Gudmundsson J. Hydrate non-pipeline technology // Proceedings of the 4th International Conferences on Gas Hydrates. – Yakohama, Japan, May 19–23, 2002. – P. 997–1002.
10. Макиян Т.Г., Землянов Е.Г. Расчет количества ингибиторов в модели газопровода // Наука и образование в Арктическом регионе. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 73–75.
11. Брилл Дж.П., Мукерджи Х. Многофазный поток в скважинах. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 384 с.
12. Фаресов А.В., Шагапов А.В., Пономарев А.И. Исследование эффективности ингибиторов гидратообразования кинетического типа // Нефтегазовое дело. – 2013. – Т. 11. – № 4. – С. 86–95.
13. Синергетические эффекты при ингибировании образования газовых гидратов в многокомпонентных системах / А.П. Семенов, Р.И.М. Мендгазиев, А.С. Стопорев, П.А. Гушин, В.С. Якушев, В.А. Винокуров // От синтеза полиэтилена до стереодивергентности: развитие химии за 100 лет. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. – С. 252–254.
14. Application of various water soluble polymers in gas hydrate inhibition / M.S. Kamal, I.A. Hussein, A.S. Sultan, N. Solms // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 60. – P. 206–225.
15. Nakai S. Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain // Proceedings of the 25th world gas conferences. – Kuala Lumpur, Malaysia, June 4–8, 2012. – P. 367–375.
16. Maruyama T. Effects of guest gas on pelletizing performance of natural gas hydrate (NGH) pellets // Proceedings of the 7th ICGH 2011. – Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17–21, 2011. – P. 181–187.
17. Horiguchi K. Completion of natural gas hydrate (NGH) overland transportation demo project // Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011). – Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17–21, 2011. – P. 401.
18. Хилик Е.Д. Технология холодной перекачки Cold Flow // Молодой ученый. – 2019. – № 4 (242). – С. 74–75.
19. Raelison R.N., Verdy C., Liao H. Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: deposit possibilities, technological solutions and viable applications // Materials and Design. – 2017. – V. 133. – P. 266–287.
20. Decomposition kinetics and self-preservation of methane hydrate particles in crude oil dispersions: experiments and theory / A.A. Sizikov, V.A. Vlasov, A.S. Stoporev, A.Yu. Manakov // Energy and fuels, American Chemical Society. – 2019. – V. 33. – № 12. – P. 12353–12365.
21. Lee J., Jin Y.K., Seo Y. Characterization of cyclopentane clathrates with gaseous guests for gas storage and separation // Chemical engineering journal. – 2018. – V. 338. – P. 572–578.
22. Thermodynamic and kinetic analysis of gas hydrates for desalination of saturated salinity water / S.D. Seo, S.Y. Hong, A.K. Sum, K.H. Lee, J.D. Lee, B.R. Lee // Chemical engineering journal. – 2019. – V. 370. – P. 980–987.
23. Hammerschmidt E.G. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines // Industrial and Engineering Chemistry. – 1934. – V. 26. – № 8. – P. 851–855.
24. Carroll J.J. Natural gas hydrates. A guide for engineers. – Calgary, Canada: Elsevier Science and Technology Books, 2009. – 276 p.
25. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований вертикальных газо-жидкостных потоков и расчетов по программе OLGA / Д.В. Изюмченко, И.В. Стоноженко, К.Н. Гужов, В.А. Сулейманов, О.В. Бузинова, О.В. Николаев // Вести газовой науки. – 2016. – № 2 (26). – С. 91–95.
26. OLGA 6 GUI: user manual. – Kjeller, Norway: SPT group AS, 2008. – 240 p.
27. Cowie S., Zolotukhin A.B. Hydrate plugs in subsea pipelines and non-invasive methodology for localization. – Stavanger, Norway: University of Stavanger, 2013. – 78 p.

Поступила: 27.07.2020 г.

#### **Информация об авторах**

**Китаев С.В.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Колотилов Ю.В.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высшей и прикладной математики Астраханского государственного технического университета.

**Плотников А.Ю.**, аспирант кафедры высшей и прикладной математики Астраханского государственного технического университета.

**Ковалев А.А.**, аспирант кафедры высшей и прикладной математики Астраханского государственного технического университета.

**Шейхгасанов Ш.К.**, аспирант кафедры высшей и прикладной математики Астраханского государственного технического университета.

UDC 621.644.029

## STUDY OF EFFICIENCY OF HYDRATE FORMATION INHIBITORS IN THE PROCESS OF PRODUCTION AND TRANSPORT OF HYDROCARBONS IN MARINE CONDITIONS

**Sergey V. Kitaev**<sup>1</sup>,  
svkitaev@mail.ru

**Yury V. Kolotilov**<sup>2</sup>,  
kolotilov\_yury@mail.ru

**Anton Yu. Plotnikov**<sup>2</sup>,  
plotnikovyurii@rambler.ru

**Adel A. Kovalev**<sup>2</sup>,  
truenerd123@gmail.com

**Shamsutdin K. Sheikhasanov**<sup>2</sup>,  
sheih0113@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technical University,  
1, Kosmonvtov street, Ufa, 450062, Russia.

<sup>2</sup> Astrakhan State Technical University,  
16, Tatishchev street, Ufa, 414056, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop effective methods to prevent hydrate formation in underwater gas pipelines. The rapid formation of gas hydrates is promoted by high pressure and low temperature in deep-sea underwater structures, which is one of the most difficult problems in ensuring the operability of the pipeline. The main direction of ensuring trouble-free operation of pipelines is to support the processes of using hydrate inhibitors during the operation of hydrocarbon transport facilities, taking into account their advantages and disadvantages.

**The main aim** of the research is to develop a method for evaluating the effectiveness of hydrate inhibitors in production and transport of hydrocarbons in marine conditions.

**The objects** of the research are performance indicators for implementation of hydrate inhibitor use methods with an assessment of the risk associated with hydrate formation, which helps prevent hydrate blockage and ensure equipment integrity.

**Methods.** To increase the reliability of the interpretation of methods for the use of hydrate inhibitors, it is proposed to use the OLGA software, which is a tool for modeling the analysis of pumping oil, natural gas, and produced water during multiphase transportation. This modeling tool allows you to visualize key aspects of dynamic events that reflect the reality of hydrocarbon transportation. The OLGA software suite has allowed developing oil and gas fields in deeper waters and further offshore than it was possible without this technology.

**Results.** Using OLGA software, it was possible to consider existing methods for preventing hydrate formation and concluded that cold flow technology, as well as the addition of a 10 % methanol solution, are the most beneficial solution for the Arctic compared to other technologies and other concentrations, respectively.

### Key words:

Offshore pipeline, inhibitor, hydrate formation, software, concentration, pressure, temperature.

### REFERENCES

- Egorov A.V., Rimsky-Korsakov N.A., Liskin V.A. Metody i sredstva obnaruzheniya i issledovaniya gazovykh gidratov [Methods and means of detecting and studying gas hydrates]. *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy (MSOI-2019)* [Modern methods and means of oceanological research (MSOI-2019)]. Moscow, Institute of Oceanology im P.P. Shirshova RAN Publ., 2019. pp. 192–195.
- Ryabov A.D. Sovremenny podkhod k obrazovaniyu gazovykh gidratov: prognozirovaniye, metody preduprezhdeniya i borby [A modern approach to the formation of gas hydrates: forecasting, methods of prevention and control]. *Problemy geologii i osvoyeniya nedr* [Problems of geology and subsoil development]. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2019. pp. 166–168.
- Shirobokov O.S., Svalova M.V. Gazovye gidraty v gazoprovodakh prirodnogo gaza [Gas hydrates in natural gas pipelines]. *Aktualnye problemy sovremennoy kognitivnoy nauki* [Actual problems of modern cognitive science]. Ufa, Aeterna Publ., 2019. pp. 15–20.
- Bukhgalter E.B. *Metanol i ego ispolzovanie v gazovoy promyshlennosti* [Methanol and its use in the gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 283 p.
- Istomin V.A. *Preduprezhdenie i likvidatsiya gazovykh gidratov v sistemakh sbora i promyslovy obrabotki gaza i nefii* [Prevention and elimination of gas hydrates in the systems of collection and field processing of gas and oil]. Moscow, VNIIGAZ Publ., 1990. 213 p.
- Bukhgalter E.B., Ilyakova E.E. Regulatory aspects of environmental monitoring during offshore oil and gas production in the Arctic. *Vesti gazovoy nauki*, 2013, no. 2 (13), pp. 82–87. In Rus.
- Volkov P.V. Vybora sposoba pri teplofizicheskom vozdeystvii dlya predotvrashcheniya gidratoobrazovaniya pri podgotovke gaza i kondensata [The choice of the method under thermophysical exposure to prevent hydrate formation during the preparation of gas and condensate]. *Problemy geologii i osvoyeniya nedr* [Problems of geology and subsoil development]. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2019. Vol. 1, pp. 74–75.
- Semenov M.E., Portnyagin A.S., Koryakina V.V., Ivanova I.K. Perspektivy primeneniya tekhnologiy khraneniya i transportirovki uglevodorodnogo syrja na osnove gazovykh gidratov v usloviyakh Arktiki [Prospects for application of technologies for storage and transportation of hydrocarbons based on gas hydrates in the Arctic]. *Teplofizika i energetika arkticheskikh i subarkticheskikh territoriy* [Thermophysics and energy of the Arctic and subarctic territories]

- tories]. Moscow, National Research University MEI Publ., 2019. pp. 246–251.
9. Gudmundsson J. Hydrate non-pipeline technology. *Proceedings of the 4th International Conferences on Gas Hydrates*. Yakohama, Japan, May 19–23, 2002. pp. 997–1002.
  10. Makiyan T.G., Zemlyanov E.G. Raschet kolichestva ingibitorov v modeli gazoprovoda [Calculation of the number of inhibitors in a gas pipeline model]. *Nauka i obrazovanie v Arkticheskom regione* [Science and Education in the Arctic Region]. Murmansk, Murmansk State Technical University Publ., 2018. pp. 73–75.
  11. Brill Dzh.P., Mukerdzhi Kh. *Mnogofazny potok v skvazhinakh* [Multiphase flow in wells]. Izhevsk, Institute for Computer Research Publ., 2006. 384 p.
  12. Faresov A.V., Shagapov A.V., Ponomarev A.I. Investigation of the effectiveness of kinetic-type hydrate inhibitors. *Oil and Gas Business*, 2013, vol. 11, no. 4, pp. 86–95. In Rus.
  13. Semenov A.P., Mendgaziev R.I.M., Stoporev A.S., Gushchin P.A., Yakushev V.S., Vinokurov V.A. Sinergeticheskie efekty pri ingibirovani obrazovaniya gazovykh gidratov v mnogokomponentnykh sistemakh [Synergistic effects in inhibiting the formation of gas hydrates in multicomponent systems]. *Ot sinteza polietilena do stereodivergentnosti: razvitie khimii za 100 let* [From the synthesis of polyethylene to stereo-divergence: the development of chemistry over 100 years]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2018. pp. 252–254.
  14. Kamal M.S., Hussein I.A., Sultan A.S., Solms N. Application of various water soluble polymers in gas hydrate inhibition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, no. 60, pp. 206–225.
  15. Nakai S. Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. *Proceedings of the 25th world gas conferences*. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4–8, 2012, pp. 367–375.
  16. Maruyama T. Effects of guest gas on pelletizing performance of natural gas hydrate (NGH) pellets. *Proceedings of the 7th ICGH 2011*. Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17–21, 2011, pp. 181–187.
  17. Horiguchi K. Completion of natural gas hydrate (NGH) overland transportation demo project. *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*. Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17–21, 2011, p. 401.
  18. Khilik E.D. Cold Flow Technology. *Young Scientist*, 2019, no. 4 (242), pp. 74–75. In Rus.
  19. Raelison R.N., Verdy C., Liao H. Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications. *Materials and Design*, 2017, vol. 133, pp. 266–287.
  20. Sizikov A.A., Vlasov V.A., Stoporev A.S., Manakov A.Yu. Decomposition kinetics and self-preservation of methane hydrate particles in crude oil dispersions: experiments and theory. *Energy and fuels, American Chemical Society*, 2019, vol. 33, no. 12, pp. 12353–12365.
  21. Lee J., Jin Y.K., Seo Y. Characterization of cyclopentane clathrates with gaseous guests for gas storage and separation. *Chemical engineering journal*, 2018, vol. 338, pp. 572–578.
  22. Seo S.D., Hong S.Y., Sum A.K., Lee K.H., Lee J.D., Lee B.R. Thermodynamic and kinetic analysis of gas hydrates for desalination of saturated salinity water. *Chemical engineering journal*, 2019, vol. 370, pp. 980–987.
  23. Hammerschmidt E.G. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1934, vol. 26, no. 8, pp. 851–855.
  24. Carroll J.J. *Natural gas hydrates. A guide for engineers*. Calgary, Canada, Elsevier Science and Technology Books Publ., 2009. 276 p.
  25. Izyumchenko D.V., Stonozhenko I.V., Guzhov K.N., Suleimanov V.A., Buzinova O.V., Nikolaev O.V. Comparative analysis of the results of experimental studies of vertical gas-liquid flows and calculations using the OLGA program. *Vesti gazovoy nauki*, 2016, no. 2 (26), pp. 91–95. In Rus.
  26. *OLGA 6 GUI: user manual*. Kjeller, Norway, SPT group AS Publ., 2008. 240 p.
  27. Cowie S., Zolotukhin A.B. *Hydrate plugs in subsea pipelines and non-invasive methodology for localization*. Stavanger (Norway), University of Stavanger Publ., 2013. 78 p.

Received: 27 July 2020.

#### Information about the authors

**Sergei V. Kitaev**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Yury V. Kolotilov**, Dr. Sc., professor, Astrakhan State Technical University.

**Anton Yu. Plotnikov**, graduate student, Astrakhan State Technical University.

**Adel A. Kovalev**, graduate student, Astrakhan State Technical University.

**Shamsutdin K. Sheikhasanov**, graduate student, Astrakhan State Technical University.



УДК 556.314

## ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД И ВМЕЩАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ КУЗБАССА С ОЦЕНКОЙ ВОДНОЙ МИГРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ НАРЫККО-ОСТАШКИНСКОЙ ПЛОЩАДИ)

Лепокурова Олеся Евгеньевна<sup>1,2</sup>,  
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Домрочева Евгения Витальевна<sup>1</sup>,  
DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

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

**Актуальность** работы связана с региональной спецификой нагрузки угольных отложений и объектов угольного комплекса на водные объекты. Полученные данные позволяют расширить представления об общих закономерностях распределения элементов в системе «вода – угленосная порода» и в дальнейшем использовать их при различных экологических и поисковых исследованиях.

**Цель:** изучить особенности распределения максимального количества компонентов в природных водах региона и состав вмещающих пород, оценить скорость выноса химических элементов из пород.

**Объекты:** поверхностные и подземные воды Нарыкско-Осташкинской площади Кемеровской области, наиболее перспективной для добычи угольного метана.

**Методы:** современные методы определения химического состава вод и пород, включая массспектрометрический метод с индуктивно связанной плазмой, а также стандартные гидрогеохимические методы расчетов коэффициентов концентрирования и водной миграции.

**Результаты.** Приведены данные по 59 элементам, включая микрокомпоненты, в речных, озерных и подземных водах разных водообменов: активного, верхней части и нижней части (угленосные пласты) замедленного. Показано, что по мере возрастания времени взаимодействия системы «вода–порода» увеличивается минерализация, содержание основных ионов, спектр определяемых микрокомпонентов и их концентрации. Рассчитанные коэффициенты концентрирования относительно среднего для подземных вод выщелачивания умеренного климата позволили выделить элементы с высоким уровнем накопления: из макрокомпонентов – С, Na, Cl, Fe, и из микрокомпонентов – Ga, Ba, Li, Zr, Pb, B, Sc, Ni, Br, Rb, Sr, Nb, Mo, I, Ag, Cd, Cs, Hg. Также представлены данные по 48 элементам вмещающих угленосных песчаников и алевролитов, которые, совместно с литературными данными по некоторым другим элементам, позволили получить интересные зависимости. Например, что в % соотношении, относительно общей минерализации, подземные воды активного водообмена содержат на 1–2 порядка больше, чем в породах: Cu, Ag, Cd, Sr, Sn, Sb, I, Cs, Hg, Pb. С учетом состава вод и пород рассчитаны коэффициенты водной миграции, составлены ряды миграции разных типов вод, которые не выявили кардинальных различий. Во всех природных водах сильно подвижны: Na, C, Cl, I, B, N, Br, Sr, Cd, Cu, Li, Mo, Ge, Zn; слабо подвижны: Al, Ti, Zr, V, Nb, Eu, Mn, Si, Cr, Co, Fe, Rb.

### Ключевые слова:

Поверхностные и подземные воды, макро- и микрокомпонентный состав, химический состав вмещающих пород, водная миграция, Кузнецкий угольный бассейн.

### Введение

В настоящее время в подземных водах различными методами анализа определяются более 85 химических элементов таблицы Менделеева, характеризующих общий химический тип воды, ее свойства и имеющих то или иное научное и практическое значение [1, 2]. Распространенность и содержание минеральных веществ в водах различны, в связи с чем выделяют макро- и микрокомпоненты. Первые определяют химический тип вод и общую минерализацию и приводятся как основные ионы: анионы  $\text{HCO}_3^-$  ( $\text{CO}_3^{2-}$ ),  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и катионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ . Иногда к макроэлементам относят также Si, Fe и некоторые другие. Все остальные элементы находятся в воде в незначительных концентрациях (четких критериев нет, как правило, в долях мг/л и меньше), при этом они зачастую оказывают решающее значение при экологических и поисковых исследованиях.

Наличие в Кузнецком бассейне угольных отложений и объектов угольного комплекса обуславливает региональную специфику нагрузок на водные системы. Некоторые иностранные публикации по этой проблеме представлены в [3–6]. Перед авторами была поставлена задача изучить особенности распределения максимально возможного набора химических элементов в поверхностных и подземных водах региона. В этой связи наиболее удачной площадкой для изучения является Нарыкско-Осташкинская площадь Ерунаковского района Кемеровской области. На территории этой площади в последние годы интенсивно проводится бурение скважин в связи с добычей угольного метана, поэтому появилась возможность для отбора проб подземных вод, в том числе в угольных пластах. К тому же она уже исследована авторами на гидрогеологические, а особенно гидрогеохимические условия: химический, изотопный и органический состав [7–11]. Детально не приводились лишь

микрокомпоненты в водах. При этом возникла необходимость изучить не просто полный состав вод, но и посмотреть особенности перераспределения компонентов в системе «вода – вмещающая порода» как основного их источника. Для полноты исследований необходимо было также рассмотреть и элементный состав вмещающих отложений, что и помогло нам рассчитать водную миграцию, т. е. насколько элементы хорошо выносятся из пород.

#### Методы и объект исследования

Об объекте и методах полевых и некоторых аналитических исследований неоднократно авторами уже докладывалось [7–11]. Отбор проб воды осуществлялся в летне-осенний период сотрудниками Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, в ходе совместных работ с ООО «Газпром добыча Кузнецк». Физико-химические показатели (рН, метод определения – потенциометрия; удельная электропроводность – кондуктометрия), содержания главных ионов

(титрование, колориметрия), а также Si, F (фотоколориметрия), Zn (инверсионная вольтамперометрия) определялись в Проблемной научно-исследовательской гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета. Микрокомпонентный состав вод определялся на масс-спектрометре высокого разрешения (ICP-MS) ELEMENT фирмы Finnigan Mat (Germany) в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) И.В. Николаевой. Всего для анализа на ICP-MS было отобрано 43 пробы: 4 озерные, 10 речных, 29 подземных вод (рис. 1).

Также были отобраны три образца керна, представленного алевритами и песчаниками пермского возраста. Вмещающие породы анализировались в центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета на растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгеноструктурном (РСА) и, прежде всего, ICP-MS (Agilent 7500cx) методах.

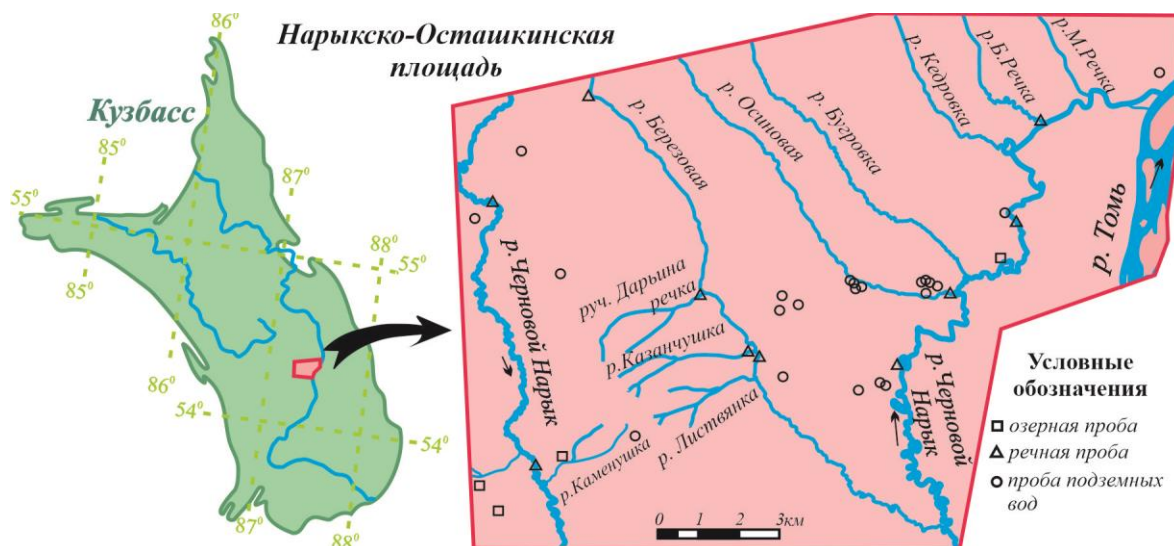


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора природных вод на микрокомпонентный состав  
 Fig. 1. Scheme of arrangement of points of natural water appropriation for micro-component composition

Таблица 1. Методы исследований элементного состава воды и пород

Table 1. Methods for studying the elemental composition of water and rocks

Метод/Method	Элементы*/Elements
Вода/Water	
ICP-MS	Li, Be, B, Al, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Yb, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U
Другие методы (титриметрия, инверсионная вольтамперометрия, потенциометрия, фотоколориметрия, турбидиметрический, ионная хроматография), в том числе с пересчетом основных ионов на элементы Other methods (titrimetry, inversion voltammetry, potentiometry, photo-colorimetry, turbidimetric, ion chromatography), including conversion of basic ions into elements	C, N, P, S, Cl, Na, K, Ca, Mg, Fe, Si, F, Zn
Порода/Rock	
ICP-MS	Li, Be, B, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Pb, Th, U
РСА/DA (diffraction analysis)	Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Fe
Литературные данные/Literature data [12]	C, N, F, S, Cl, Ge, As, Se, Br, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, I, Au, Hg, Bi

Примечание: \*в последовательности возрастания порядкового номера таблицы В.И. Менделеева.  
 Note: \*in the ascending sequence of the ordinal number of the V.I. Mendeleev table.

Детально информация, откуда был взят каждый элемент, представлена в табл. 1.

Уровни накопления (концентрирования) элементов как в воде, так и в породе, были оценены с использованием коэффициентов концентрирования ( $K_k$ ), которые определяются по формуле:

$$K_k = C_i / C_f,$$

где  $C_i$  – средняя концентрация химического элемента в данной выборке;  $C_f$  – фоновое содержание этого элемента.

В наших расчетах за фоновые концентрации были приняты данные по среднему составу подземных вод выщелачивания умеренного климата [13], включающие 52 элемента. При расчетах для пород были взяты данные по среднему составу песков и песчаников верхней части континентальной коры [12], включающие 77 элементов.

При оценке миграции элементов использовался коэффициент водной миграции  $K_x$ , предложенный Б.Б. Полюновым и А.И. Перельманом [14], который находится по следующей формуле:

$$K_x = (m_x * 100) / (a * n_x),$$

где  $a$  – сумма минеральных веществ, растворенных в воде (минерализация вод), г/л или мг/л;  $m_x$  – содержание элемента  $x$  в воде, г/л или мг/л;  $n_x$  – содержание того же элемента породах, %. В наших расчетах мы учитывали в  $n_x$  не кларковые содержания, а реально полученные по составу вмещающих пород.

#### Результаты исследований природных вод и их обсуждение

Исследование включало в себя несколько водных объектов, отличающихся разными гидрогеохимическими условиями: 1) озера и пруд; 2) реки; 3) подземные воды активного водообмена, а также 4) верхней части и 5) нижней части замедленного водообмена. Особый интерес представляют последние, циркулирующие непосредственно в пределах угольных отложений на глубинах от 400 до 1200 м и ниже, отличающиеся необычно высокой для содовых вод минерализацией (4–27 г/л) и аномально тяжелым углеродом  $\delta^{13}C$  (до +31 ‰). Причины этого были раскрыты в [9, 11]. Такие уникальные воды в Кузбассе обнаружены пока только на этой площади.

Общий химический состав природных вод территории, а также изотопный, газовый, данные по Сорг и гумусовым веществам, представлены в предыдущих работах авторов [7–9, 11]. Детально микрокомпонентный состав нами будет представлен впервые. В процессе исследований ICP-MS в водах определены содержания 46 элементов (табл. 2). Однако результаты по Be, Yb, Tl оказались ниже пределов обнаружения для всех водных объектов, а по Y, Se, Bi, Pr, Nd, Sm, In, Te, Th определены только по единичным пробам. Поэтому в табл. 2 представлены не все элементы, а только обнаруженные в концентрациях выше погрешности определения. Поскольку выборка достаточно громоздкая, мы ограничились пределами содержания и средним значением по каждому водному объекту.

*Озерные воды и воды прудов-отстойников.* Это пресные (соленость или TDS 0,1–0,8 г/л) в основном щелочные (pH от 8,0 до 9,4), исключение составляет заболоченное озеро (pH 6,7), гидрокарбонатные кальциевые, в одном пруду – гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые воды (название дается от большего к меньшему). Для них характерны достаточно низкие содержания микрокомпонентов. Выделяются на фоне остальных вод и среднего для вод малых озер лесостепи Западной Сибири [15] немного повышенными концентрациями Nb (на два порядка выше, чем в речных) до 16 мкг/л, Sb до 2 мкг/л, Ag до 50 мкг/л, U до 4,1 мкг/л, однако максимальные содержания двух последних все-таки обнаружены в подземных водах.

*Речные воды.* В пределах исследуемой площади отобраны пробы вод из рек Черновой Нарык (основная водная артерия), Казанчушка, Дарьина Речка, Березовая, Большая речка, Осиновка и безымянный ручей. Воды пресные (TDS 0,3–0,6 г/л) слабощелочные и щелочные (pH от 7,6 до 8,9) гидрокарбонатные кальциевые с достаточно высоким содержанием органического вещества (Сорг от 2,4 до 36,6 мг/л). Микрокомпонентный состав самый бедный из представленных природных вод площади (табл. 2). Обнаружен только Zn в концентрациях 3,5–650 мкг/л (в 20 раз больше озерных) и в 4 пробах Pb 0,03–59 мкг/л и Y 0,002–0,068 мкг/л (в остальных случаях – ниже пределов обнаружения). Последний, наряду с La, Ce, Eu, на порядок меньше, чем определен для речных вод региона [16–18].

Таблица 2. Микрокомпонентный состав природных вод по результатам ICP-MS, мкг/л (\*мг/л)

Table 2. Trace elements in nature water by results of ICP-MS, µg/L (\*mg/L)

Элемент Elemen	Поверхностные воды/Surface water		Подземные воды/Ground water		
	Озера Lakes	Реки Rivers	активного в/о** top	замедленного в/о middle	нижняя часть замедленного в/о bottom
TDS*	0,1–0,8 0,5	0,3–0,7 0,4	0,4–0,8 0,5	0,9–1,5 1,2	10,0–19,6 14,7
pH	6,7–9,4 8	7,6–8,9 8,2	7–7,9 7,6	7,5–9,9 8,6	7,8–8,5 8,2
Eh, мВ/mV	100–196 141	59–202 171	–157–211 –78	–117–(–56) –86	–171–(–62) –94
Состав вод Chemical type	HCO <sub>3</sub> -Ca			HCO <sub>3</sub> -Na	
Сорг, DOC*	4,1–15,3 8,3	2,4–36,6 9,6	1,3–7,9 3,6	3,6–7,4 5,2	12,8–52,8 26,0
Li	0,3–38,0 19,0	2,0–120,0 17,0	0,4–80,0 23,0	60,0–150,0 100,0	1000–7000 3100
B*	0,04–0,06 0,05	0,01–0,15 0,03	0,03–0,29 0,18	0,26–0,71 0,49	2,3–16,0 8,1

<i>F*</i>	<u>0.04–0.26</u> 0,15	<u>0.18–0.22</u> 0,19	<u>0.04–0.18</u> 0,12	<u>0.29–0.72</u> 0,50	<u>0.56–2.69</u> 1,33
Al	<u>4.5–150.0</u> 70,9	<u>0.1–2.3</u> 0,9	<u>0.4–2400.0</u> 538,4	<u>&lt;0.2–24.0</u> <12,1	<u>&lt;0.2–1000.0</u> <238,6
<i>Si*</i>	<u>0.29–3.01</u> 1,75	<u>1.53–4.92</u> 3,61	<u>0.90–10.20</u> 5,90	<u>5.09–8.27</u> 6,68	<u>5.94–17.54</u> 10,97
Br*	<u>0.005–0.06</u> 0,03	<u>0.01–0.07</u> 0,02	<u>0.01–0.14</u> 0,06	<u>0.16–0.32</u> 0,24	<u>1.0–8.7</u> 2,89
Sr*	<u>0.08–0.60</u> 0,31	<u>0.19–0.40</u> 0,27	<u>0.05–0.99</u> 0,31	<u>0.12–2.50</u> 1,31	<u>1.0–6.2</u> 2,75
Ba*	<u>0.001–0.100</u> 0,041	<u>0.004–0.120</u> 0,049	<u>0.001–0.700</u> 0,131	<u>0.41–0.26</u> 0,35	<u>5.0–17.0</u> 12,0
Sc	<u>0.25–2.4</u> 1,36	<u>0.18–1.10</u> 0,33	<u>0.04–40.0</u> 6,08	<u>0.17–2.90</u> 1,54	<u>0.27–4.1</u> 2,34
Ti	<1,4	<u>&lt;1.8–0.6</u> <0,4	<u>1.8–63.0</u> 17,5	<u>1.8–2.4</u> <2,1	<u>&lt;1.8–44.0</u> <19,0
V	<u>2.1–4.9</u> 3,5	<u>0.8–5.6</u> 2,1	<u>0.3–9.7</u> 4,2	<u>1.5–27.1</u> 14,2	<u>1.6–7.8</u> 4,7
Cr	<u>0.5–4.6</u> 2,6	<u>&lt;0.1–0.5</u> <0,3	<u>&lt;0.1–19.0</u> <4,8	<u>&lt;1.2–2.9</u> <2,0	<u>&lt;1.0–23.0</u> <8,0
Mn	<u>&lt;0.1–16.0</u> <9,8	<u>&lt;0.1–10.0</u> <0,4	<u>0.1–400.0</u> 88,7	<u>4.0–16.0</u> 10,0	<u>&lt;0.1–150</u> <35,4
<i>Fe*</i>	<u>0.05–5.29</u> 2,88	<u>0.17–1.63</u> 0,71	<u>0.4–24.5</u> 5,1	<u>0.33–2.20</u> 1,26	<u>5.5–19.0</u> 11,1
Co	<u>&lt;0.10–0.22</u> <0,14	<u>&lt;0.10–0.63</u> <0,13	<u>&lt;0.10–13.0</u> <0,24	<u>&lt;0.10–0.71</u> <0,41	<u>0.43–5.50</u> 2,11
Ni	<u>&lt;0.55–11.0</u> <3,42	<u>&lt;0.55–1.7</u> <0,92	<u>&lt;0.55–59.0</u> <3,68	<u>&lt;0.55–14.0</u> <0,73	<u>&lt;0.55–690.0</u> <89,1
Cu	<u>&lt;0.22–52.0</u> <15,0	<u>&lt;0.22–3.7</u> <2,4	<u>&lt;0.22–740.0</u> <101,4	<u>&lt;0.22–45.0</u> <22,6	<u>&lt;0.22–180.0</u> <42,9
Zn	4,5	<u>3.5–650.0</u> 79,8	<u>4.5–120.0</u> 49,3	1,4	<u>0.35–410.0</u> 205,2
Ga	<u>0.4–4.9</u> 2,6	<u>0.2–8.6</u> 2,7	<u>0.3–46.0</u> 8,7	<u>15.0–22.0</u> 18,5	<u>250–1000</u> 714
Ge	<u>0.10–0.64</u> 0,42	<u>&lt;0.05–0.92</u> <0,18	<u>&lt;0.50–2.60</u> <0,72	<u>0.71–1.50</u> 1,11	<u>1.10–70.0</u> 27,56
As	<u>&lt;0.81–9.0</u> <2,98	<u>&lt;0.08–1.90</u> <0,7	<u>0.81–26.0</u> <6,9	<u>&lt;0.8–7.9</u> <4,4	<u>&lt;0.8–17.0</u> <7,7
Rb	<u>&lt;0.1–3.1</u> <1,4	<u>&lt;0.1–5.4</u> <0,4	<u>0.3–6.2</u> 4,4	<u>0.8–3.9</u> 2,3	<u>11.0–310.0</u> 60,2
Zr	<u>&lt;0.10–0.13</u> <0,11	<u>&lt;0.01–0.19</u> <0,07	<u>&lt;0.10–39.0</u> <2,9	<u>&lt;0.10–1.40</u> <0,75	<u>24.0–880.0</u> 337,1
Nb	<u>0.09–16.0</u> 4,69	<u>&lt;0.007–0.044</u> <0,012	<u>&lt;0.057–2.00</u> <0,25	<u>&lt;0.052–0.170</u> <0,110	<u>&lt;0.06–180.0</u> <46,70
Mo	<u>&lt;0.33–3.6</u> <1,1	<u>0.3–1.3</u> 0,6	<u>&lt;0.33–22.0</u> <1,9	<u>&lt;0.33–8.3</u> <4,3	<u>0.3–28.0</u> 12,4
Ag	<u>&lt;0.01–50.0</u> <14,4	<u>&lt;0.01–12.0</u> <1,5	<u>&lt;0.1–62.0</u> <17,8	<u>1.5–7.7</u> 4,6	<u>&lt;0.1–11.0</u> <1,9
Cd	<u>0.1–2.8</u> 1,5	<u>&lt;0.06–2.3</u> <0,3	<u>&lt;0.5–57.0</u> <6,2	<u>0.6–2.3</u> 1,5	<u>1.0–4.6</u> 2,4
Sn	<u>&lt;0.02–0.17</u> <0,05	<0,02	<u>&lt;0.02–46.0</u> <5,90	<u>&lt;0.17–0.66</u> <0,42	<u>&lt;0.17–3.60</u> <0,76
Sb	<u>&lt;0.14–2.00</u> <0,81	<u>&lt;0.02–1.20</u> <0,18	<u>&lt;0.14–5.90</u> <0,63	<u>0.14–0.59</u> 0,37	<0,14
I	<u>9.0–36.0</u> 23,8	<u>1.4–23.0</u> 5,9	<u>2.0–34.0</u> 20,0	<u>56.0–69.0</u> 62,5	<u>98.0–460.0</u> 228,5
Cs	<u>&lt;0.005–2.4</u> <1,3	<u>&lt;0.005–1.1</u> <0,1	<u>0.01–40.0</u> 6,1	<u>&lt;0.005–0.17</u> <0,11	<u>0.3–4.1</u> 2,5
Hg	<u>&lt;0.01–0.53</u> <0,14	<0,04	<u>&lt;0.04–2.20</u> <0,70	<u>&lt;0.45–1.60</u> <0,80	<u>0.70–6.20</u> 2,34
La	<u>&lt;0.0004–10.0</u> <3,33	<u>&lt;0.0004–0.05</u> <0,03	<u>&lt;0.0004–60.0</u> <10,53	<u>&lt;0.0004–1.2</u> <0,6	<u>&lt;0.0004–30</u> <5
Ce	<0,033	<0,004	<u>&lt;0.03–11.0</u> <0,93	<0,033	<u>&lt;0.03–0.63</u> <0,80
Eu	<u>0.006–0.056</u> 0,034	<u>&lt;0.006–0.016</u> <0,007	<u>&lt;0.04–0.24</u> <0,05	<0,07	<u>&lt;0.07–1.40</u> <1,02
Pb	<u>&lt;0.5–4.60</u> <1,60	<u>&lt;0.008–59.0</u> <5,90	<u>0.05–3400.0</u> 447,0	<u>1.2–32.0</u> 16,6	<u>0.05–1900</u> 329
Th	<u>&lt;4*10<sup>-4</sup>–0.11</u> <0,036	<u>&lt;4*10<sup>-4</sup>–0.095</u> <9,85*10 <sup>-3</sup>	<0,095	<0,035	<u>&lt;0.09–0.34</u> <0,15
U	<u>&lt;0.03–4.1</u> <1,9	<u>0.9–2.8</u> 1,5	<u>0.1–5.2</u> 1,4	<u>&lt;0.03–16.0</u> <8,0	<u>&lt;0.03–1.9</u> <1,1

Примечание. Курсивом – выполнено другим методом (табл. 1); \*\*%/о – водообмен.

Note. Italics – performed using a different method (table 1); \*\*%/o – water exchange.

*Подземные воды зоны активного водообмена* распространены в верхней части разреза, сложенной рыхлыми мезо-кайнозойскими (преимущественно четвертичными) отложениями, и в зоне интенсивной трещиноватости юрских отложений. Это пресные (соленость от 0,4 до 0,8 г/л) воды, которые распространены до глубины ориентировочно 150 м. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциевые, в основном нейтральные, реже слабощелочные, pH не превышает 8,0. Повсеместно содержания микрокомпонентов больше, чем для поверхностных вод. Несмотря на это, есть элементы, концентрации которых больше, чем в ниже залегающих водах: Al (до 2,4 мг/л), Sc (до 40 мкг/л), Ti (до 63 мкг/л), Mn, Fe (до 25 мг/л), Ni, Cu (до 740 мкг/л), Zn, As, Zr, Ag (до 62 мкг/л), Cd (до 57 мкг/л), Sn (до 46 мкг/л), Sb (до 59 мкг/л), Cs (до 40 мкг/л), La (до 60 мкг/л), Ce, Pb (до 3,4 мг/л). Содержания практически всех перечисленных элементов в среднем выше, чем в подземных водах палеозойских отложений верхней динамической зоны региона [19–20].

*Подземные воды зоны замедленного водообмена* залегают на данной площади в песчаных средневерхнепермских отложениях, частично в эффузивно-осадочных отложениях триаса. Верхняя граница их распространения находится на глубине от 100–200 м.

*В верхней части зоны (с интенсивно трещиноватыми породами)* распространены воды уже с более высокой минерализацией (от 0,9 до 1,5 г/л) и высокой щелочностью (pH от 7,5 до 9,9), меняется и их состав: становится гидрокарбонатный натриевый. Залегают они на глубинах 150–400 м. Микрокомпонентный состав данных вод представлен всего двумя пробами. Концентрации большинства элементов немного больше, чем в вышезалегающих водах, но особых аномалий не отмечено. Из выделяющихся только V до 27,1 и U до 16 мкг/л. Обнаружен в одной пробе In в концентрациях 47 мкг/л, в других типах вод в следовых количествах или не найден.

*В нижней части зоны замедленного водообмена (зона затухающей трещиноватости)*, на глубине начиная с 400–500 и до 1200 м, а возможно, и ниже, развиты солоноватые и даже соленые (до 25 г/л) содовые воды уже непосредственно в пределах угольных отложений. Такая необычная соленость для содовых вод увеличивается за счет продолжающегося увеличения содержания  $\text{HCO}_3$  и Na. В составе водорастворенного газа превалирует метан (70–99 %). Воды более всех обогащены органическими веществами.

Для данных вод выявлен широкий спектр микрокомпонентов и в достаточно высоких концентрациях. Только для них выявлены во всех пробах в концентрациях выше пределов обнаружения такие элементы, как: Co, Se, Zr, Mo, Hg. В высоких содержаниях, по сравнению с другими природными водами, находятся: Li (до 7 мг/л), B (до 16 мг/л), F (до 2,7 мг/л), Si (до 18 мг/л), Br (до 8,7 мг/л), Sr (до 6,2 мг/л), Ba (до 17 мг/л), Sc (до 4,1 мкг/л), Ti (до 44 мкг/л), Cr (23 мкг/л), Co (до 5,5 мкг/л), Ni (до 690 мкг/л), Zn (до 410 мкг/л), Ga (до 1 мг/л), Ge (до 70 мкг/л), Rb (до 310 мкг/л), Zr (до 880 мкг/л), Nb (до 180 мкг/л), Mo

(до 28 мкг/л), I (до 460 мкг/л), Hg (до 6,2 мкг/л), Eu (до 1,4 мкг/л), Pb (до 1,9 мг/л), Th (до 0,34 мкг/л) и др.

Общие особенности распределения микроэлементов в природных водах площади следующие.

1. Во всех типах природных вод не обнаружены (ниже пределов обнаружения) следующие элементы: Be, Yb, Tl, практически во всех In, Pr (кроме вод верхней части замедленного водообмена), Ni, Y (кроме речных), Se (кроме речных и вод угольных отложений). Единично определены: Nd, Te (в зоне активного и нижней части замедленного водообмена), Sm (в зоне активного), Ti (в речных, зоны активного и замедленного), Bi (во всех, кроме вод угольных отложений), Th.
2. Для всех подземных вод спектр определяемых микрокомпонентов больше и концентрации их обычно всегда выше, чем для поверхностных. Однако превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК) для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового пользования [21, 22] не так много, и все они характерны только для соленых содовых вод угольных отложений: Ba (в 100 раз), B и Pb (в 10 раз), Li (в 3 раза выше ПДК), Cd, J и Br (в 2 раза), Al и Hg (на уровне ПДК). Отмеченные случаи имеют в подавляющем большинстве природное происхождение.
3. Проведенные расчеты коэффициентов концентрирования элементов (не только микро, но и макро) в изученных водах относительно вод выщелачивания умеренного климата показали (рис. 2), что высокие уровни накопления ( $K_k > 10$ ) характерны в основном для некоторых элементов подземных вод нижней части замедленного водообмена: из макрокомпонентов – C, Na, Cl, Fe, и микрокомпонентов – Ga, Ba, Li, Zr, Pb, B, Sc, Ni, Br, Rb, Sr, Nb, Mo, I, Ag, Cd, Cs, Hg. Также достаточно высоким уровнем накопления отличаются Sc, Ga и Ag во всех водах. V и U в подземных водах верхней части замедленного водообмена и Pb, Cs в зоне активного водообмена. В речных водах практически все изученные элементы, кроме Sc, Ga и Ag, характеризуются низкой концентрирующей способностью ( $< 1$ ), а такие элементы, как Al, Mn, Nb и Pb, в 100 и даже более раз меньше, чем в среднем для умеренного климата (что закономерно, поскольку это кларк для подземных вод).
4. С увеличением минерализации вод возрастают концентрации таких компонентов, как Ba, B, Br, Sr, Li, Mn, Al, Pb, Ga, Ge, As, Sn, Zr, I, Rb, Zr, Hg, Co, Eu, Nb, Cu. Некоторые зависимости представлены на рис. 3, а–г. Не выявлены связи с соленостью для Cs и La. Содержания таких элементов, как Sc, V, Ni, Bi, Cd, Ag, Sb, U, остаются примерно на том же уровне и не меняются от значений минерализации.
5. Органические вещества в поверхностных и подземных водах ведут себя сложным образом и контролируются такими параметрами, как Сорг, химическое поглощение кислорода (ХПК), перманганатная окисляемость (ПО), фульво- и гуминовые кислоты (ФК и ГК) [8]. Общие закономерно-

сти распределения их в разных типах вод на территории Нарыкско-Осташкинской площади не выявлены. Поэтому изучение связи органики с микроэлементами не показало результатов. Ис-

ключение составили Al и Mn, для которых выявлена четкая обратная зависимость от показателя  $C_{орг}$  (рис. 3, *h, i*), менее четкая для Cd.

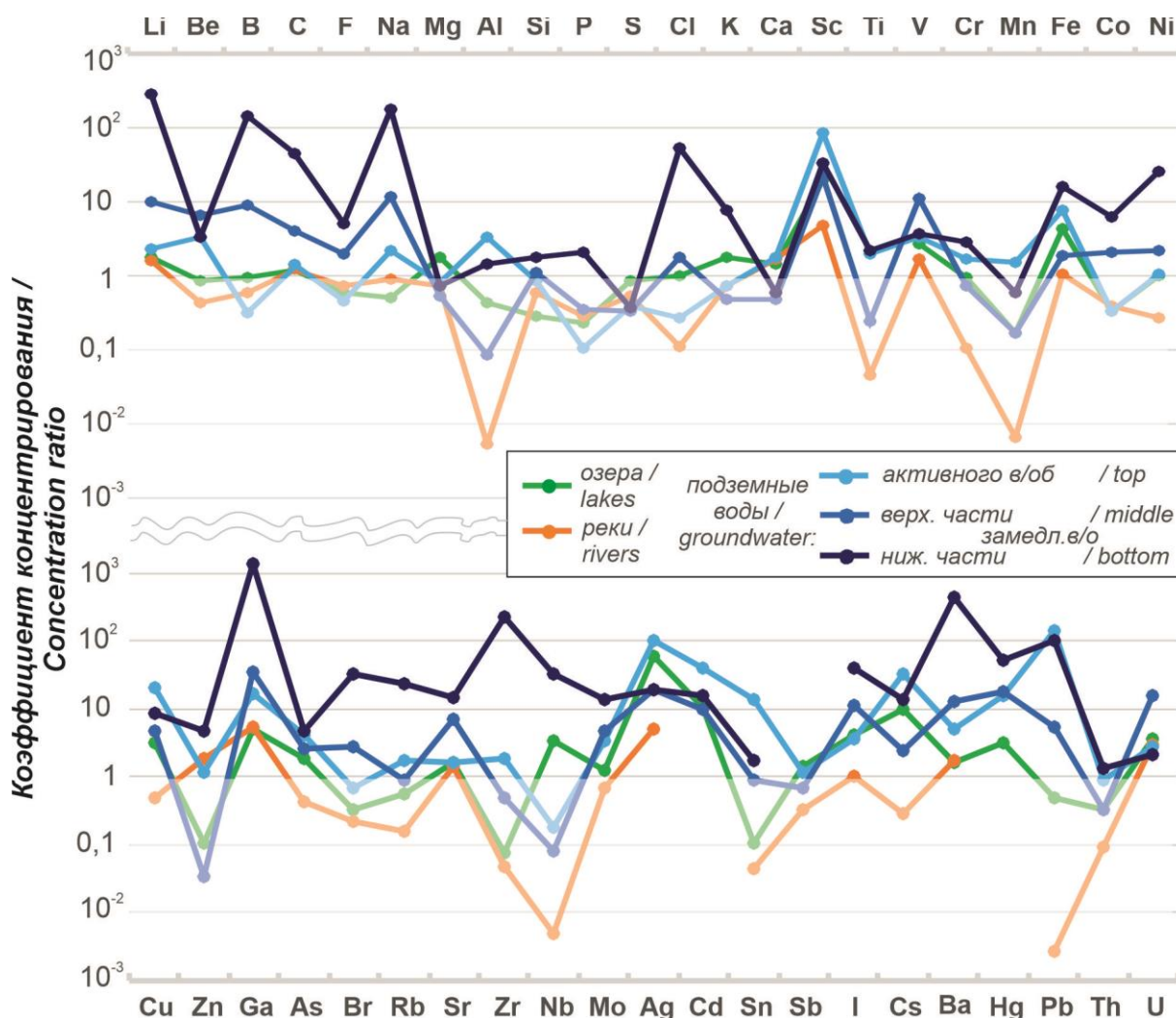


Рис. 2. Коэффициенты концентрирования некоторых элементов в природных водах территории  
 Fig. 2. Concentration ratios of some elements in the natural waters of the territory

#### Результаты исследований пород

Результаты петрографического и рентгеноструктурного анализов показали, что образцы представляют собой осадочные породы – алевриты и песчаники (рис. 4). Минеральный состав в среднем представлен кварцем (76–82 %), плагиоклазами (10–14 %), гидрослюдами (2–25 %), органическим веществом (3 %). Из вторичных минералов присутствуют кальцит (2–10 %), доломит (3–5 %) и хлорит (7–15 %), которые развиты по трещинам, полостям, а также замещают породообразующие минералы. Результаты исследования при помощи растровой электронной микроскопии, совмещенной с микрозондовым анализом, также подтвердили наличие вторичных сидерита и альбита (рис. 4), а из аксессуарных – циркона и ильменита.

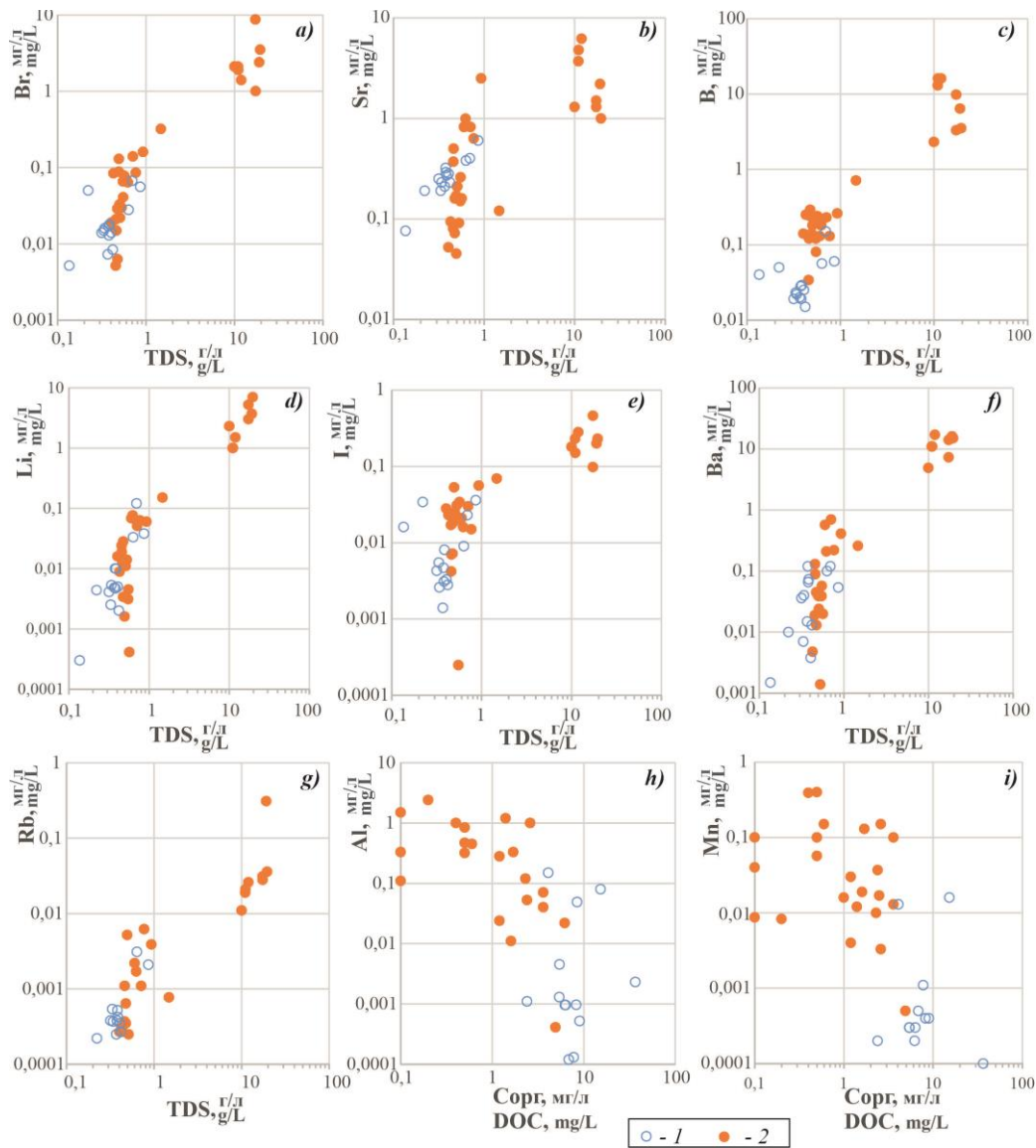
Петрохимический состав образцов представлен в табл. 3. Его мы использовали при пересчете содержа-

ний Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, P и проверке Ti, Mn. По остальным 40 элементам мы воспользовались результатами методов ICP-MS (табл. 4).

Рассчитанные коэффициенты концентрирования элементов относительно среднего состава песчаников показали достаточно ровный результат в пределах 0,5–2,0. Таким образом, вмещающие пески и алевриты в повышенных концентрациях ( $K_k > 1,5$ ) содержат W, Pb, Nb, Sc, Ce, Nd, Pr, Gd, Ga, La и даже Mg, но в целом содержания их даже ниже, чем на соседних угольных разрезах [23–24].

#### Сравнительное содержание элементов в воде и в вмещающей породе

Наглядно общую сравнительную оценку содержания элементов во вмещающих песчаниках и алевритах и в воде (относительно общей минерализации) можно увидеть на рис. 7.



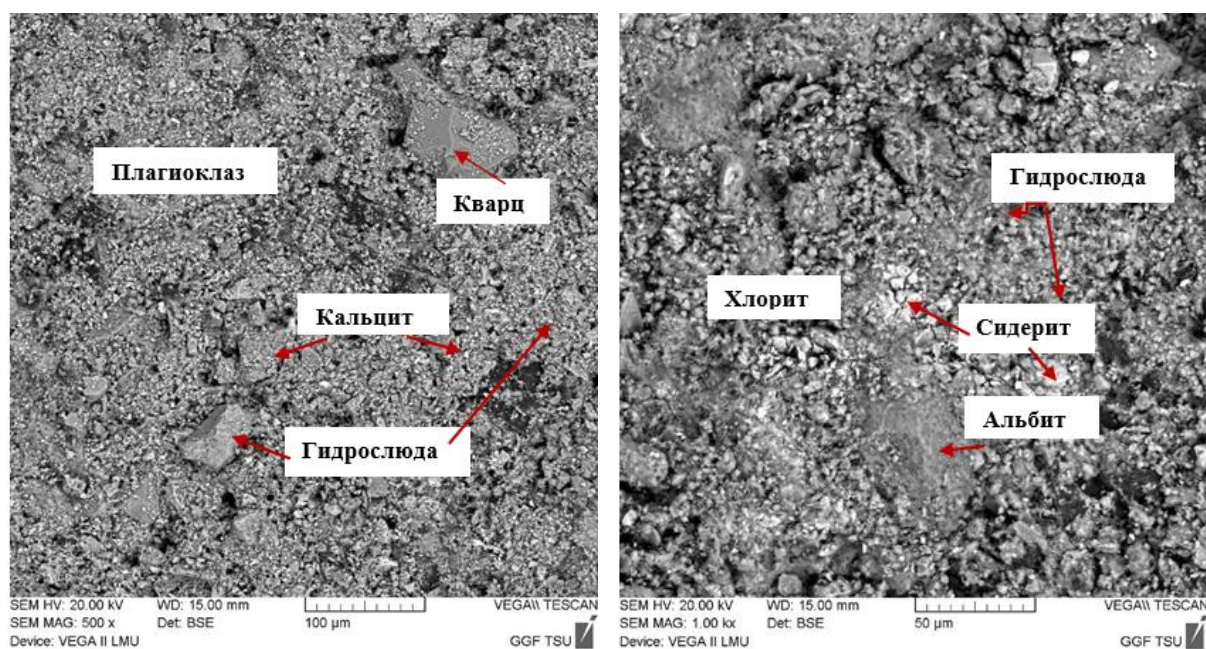
**Рис. 3.** Зависимости концентраций некоторых микрокомпонентов от солёности (а–г) и показателя *Сорг* (h, i) вод: 1 – поверхностные воды; 2 – подземные воды

**Fig. 3.** Dependences of microelements concentration on water salinity (a–g) and DOC (h, i): 1 – surface water; 2 – ground water



**Рис. 4.** Алевролит полевошпат-кварцевый слюдистый сланцевидный: фото в натуральную величину (слева) и под микроскопом без анализатора, ширина поля зрения 1,12 мм (справа)

**Fig. 4.** Siltstone feldspar-quartz micaceous shale: photo in full size (left) and under a microscope without an analyzer, field of view 1,12 mm (right)



**Рис. 5.** Снимки свежего скола образца, выполненные на растровом электронном микроскопе

**Fig. 5.** Photograph of a fresh chipped sample made on a scanning electron microscope

**Таблица 3.** Петрохимический состав вмещающих пород, %

**Table 3.** Petrochemical composition of host rocks, %

№ образца Sample no.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
1	58,433	0,826	18,237	4,825	3,130	3,081	0,099	1,208	2,525	0,155
2	58,701	0,734	19,794	7,642	1,791	2,930	0,047	1,233	2,583	0,182
3	58,054	0,809	19,099	4,038	2,937	2,945	0,074	1,797	2,484	0,166

**Таблица 4.** Элементный состав пермских песчаников и алевритов по результатам ICP-MS, г/м

**Table 4.** Elemental composition of Permian sandstones and siltstones based on ICP-MS results, ppm

Элемент Element				Элемент Element			
Li	28,04	44,70	29,18	La	28,05	32,26	30,39
Be	1,92	2,17	2,12	Ce	69,44	76,76	70,87
B	23,76	38,41	24,52	Pr	7,07	8,27	7,46
Sc	8,52	12,93	9,11	Nd	26,99	32,41	28,31
Ti	3805,10	4670,80	3982,99	Sm	5,21	6,55	5,46
V	66,23	96,07	68,00	Eu	1,16	1,20	1,19
Cr	66,50	62,20	67,95	Gd	4,51	5,07	4,62
Mn	563,65	332,00	497,83	Tb	0,71	0,74	0,73
Co	14,60	6,24	17,01	Dy	4,05	3,95	4,24
Ni	51,71	23,16	59,69	Ho	0,83	0,80	0,86
Cu	18,57	11,78	20,71	Er	2,38	2,61	2,53
Zn	64,00	96,93	73,25	Tm	0,37	0,39	0,38
Ga	12,57	19,99	14,24	Yb	2,32	2,61	2,50
Rb	53,88	68,16	65,45	Lu	0,36	0,42	0,37
Sr	170,34	171,61	177,78	Hf	4,80	6,27	4,94
Y	21,69	19,43	22,48	Ta	0,65	0,72	0,72
Zr	181,90	253,41	186,27	W	4,16	4,57	2,30
Nb	11,34	12,55	12,04	Pb	19,66	37,55	25,20
Cs	2,58	3,48	2,85	Th	8,64	8,78	9,51
Ba	235,28	469,43	309,68	U	2,72	2,10	2,91



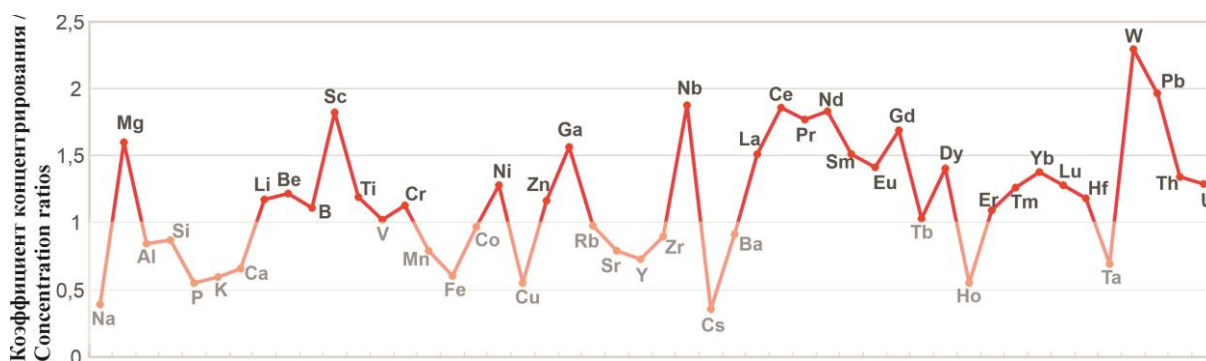


Рис. 6. Коэффициенты концентрирования элементов в вмещающих породах территории относительно среднего для песчаников [12]

Fig. 6. Concentration ratios of some elements in the rocks of the territory relative to the average for sandstones

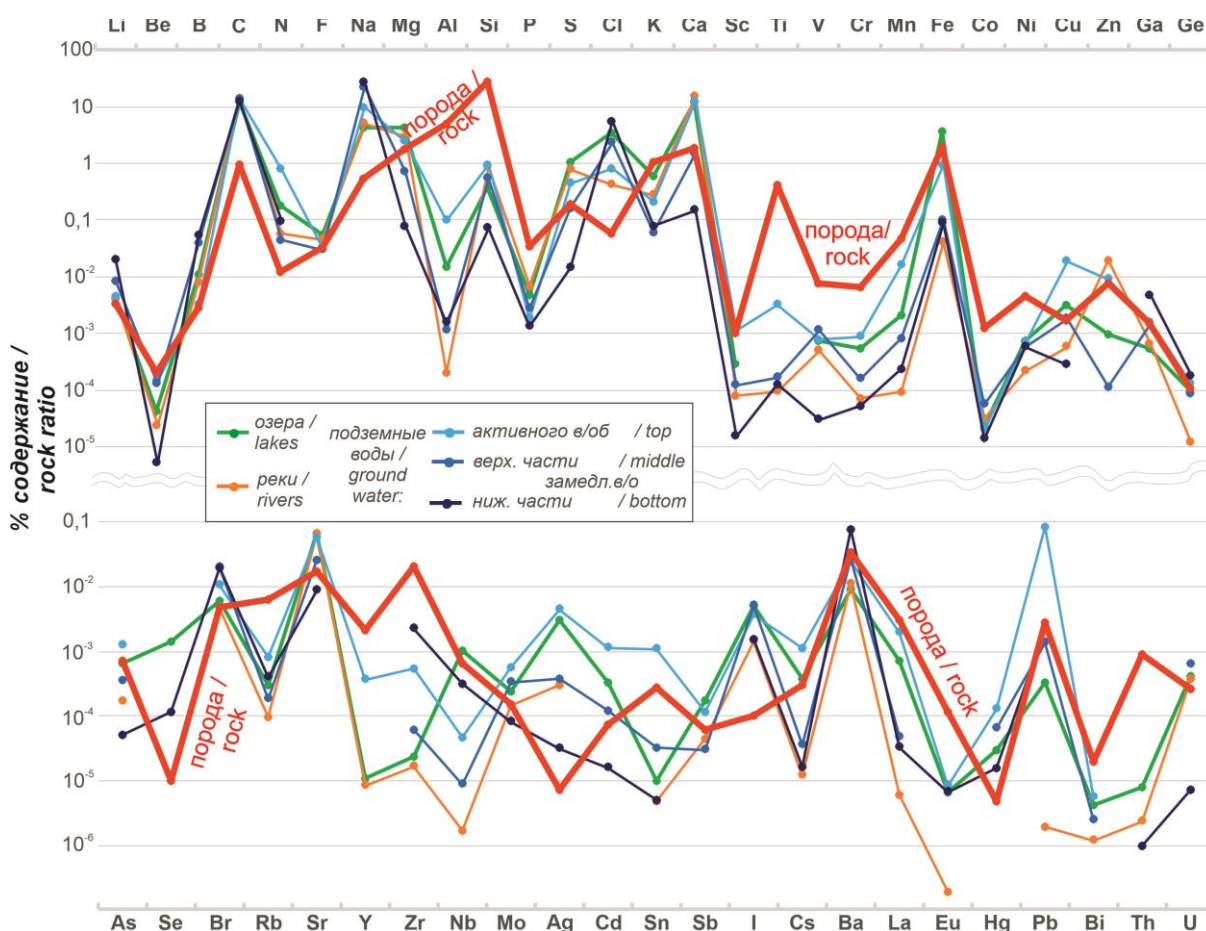


Рис. 7. Сравнительное содержание химических элементов в породе и в воде (% относительно общей минерализации)

Fig. 7. Comparative content of chemical elements in rock and in water (% relative to the total mineralization)

Во всех природных водах в повышенных концентрациях относительно пород содержатся такие элементы, как Na, C, Cl, N, в водах верхней зоны – Ca, Mg и S; из микрокомпонентов – B, Ag, I, Hg. Однако три последних не были определены непосредственно во вмещающих породах территории, и нами использовались средние величины для песчаников. Поэтому в интерпретации их высоких концентраций относительно пород и, соответственно, водной миграции надо быть осторожнее.

Можно отметить, что в подземных водах активного водообмена в % отношении относительно общей минерализации хорошо накапливаются (на 1–2 по-

рядка больше, чем в породах) следующие элементы: Cu, Ag, Cd, Sr, Sn, Sb, I, Cs, Hg, Pb.

Наоборот, намного ниже, чем в породах, во всех водах содержание: Al, Si, Be, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb, Zr, Eu, Bi, Th. При этом, несмотря на высокие абсолютные значения большинства компонентов в водах зоны замедленного водообмена, в относительных значениях от солёности значения части элементов самые низкие: Be, Mg, Si, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Co, Cu, As, Se, Sr, Mo, Ag, Cd, Sn, Cs, Th, U.

Для более детального сравнения пород с водами проведем ниже расчеты по интенсивности миграции.

**Оценка водной миграции химических элементов в системе «вода–порода»**

Вопросами водной миграции в условиях зоны гипергенеза активно занимался А.И. Перельман [14], который установил основные факторы подвижности, оценил интенсивность водной миграции, предложил методы ее определения, установил разнообразие миграции в разных геохимических обстановках, разработал гидрогеохимическую классификацию элементов, классификацию водной миграции, геохимических барьеров и т. д. Составленные им ряды миграции элементов на основе рассчитанных коэффициентов водной миграции показывают среднюю условную скорость выноса химических элементов относительно кларковых их содержаний в горных породах. В нашем случае мы воспользовались полученными данными по составу вмещающих пород и вод в конкретных природных условиях. Более детально эти расчеты были описаны выше.

Стоит также отметить, что С.Л. Шварцев [13, 25] предложил для более объективной оценки миграции

также использовать коэффициент осаждения ( $K_o$ ) и коэффициент геохимической подвижности ( $K_p$ ). Первый определяет относительную степень связывания элементов вторичными продуктами, а второй – способность элемента концентрироваться в растворе относительно общей солености и доли, связываемой вторичными продуктами. Однако в данной работе они не используются, так как не хватает для этого отдельной информации по составу вторичной фазы.

Коэффициенты рассчитаны только для 48 химических элементов, остальные либо не определены в водах, либо не определены в породах и при замене кларком дают сильно сомнительный результат, например, Ag и Hg. Чем больше  $K_x$ , тем интенсивнее элемент выщелачивается из вмещающих пород. Из-за громоздкости данных конкретные значения коэффициентов не приведены. По ним составлены ряды интенсивности выноса химических элементов из пород или ряды водной миграции с интервалом значений  $K_x$  в один порядок (табл. 5).

**Таблица 5.** Ряды водной миграции

**Table 5.** Rows of water migration

Интенсивность миграции Migration intensity	$K_x$	Поверхностные воды Surface water		Подземные воды Ground water		
		Озера Lake	Реки River	активного в/о top	верх. части замед. в/о middle	ниж. части замед. в/о bottom
Очень сильная Very high	>10	N, I, Pb, Na, Cl, C	C, I	N, I, Pb, Na, Cd, C, Cl, Cu	I, Na, Cl, C, B	Cl, Na, B, I, C, Se
Сильная High	1–10	Ca, S, Cd, Sn, Sr, Sb, Mg, Cu, F, U, Mo, Li, Cs, Br, Ge, Zn, B	Na, Ca, Cl, N, S, Sr, B, Zn, Mg, U, F, Li,	Ca, Sn, Cs, Mo, Sr, S, Br, Sb, As, Mg, Li, Ge, Zn, B, Sc, Ga, U	Br, N, U, Li, Mo, Cd, Sr, Cu, F	N, Li, Br, Ga, Ba, Ge
Средняя Middle	0,1–1	As, Ba, K, Fe, Ga, Sc, La, Bi, Be, Y, Ni, Cr, Rb	Mo, Br, Sb, Ga, Cu, Ba, K, As, P, Be, Ge	Be, Ba, F, La, Fe, Mn, Bi, K, Y, Ni, Cr, Rb, V	Ga, S, Ge, Ba, Ca, Be, As, Pb, Sb, Mg, V, Ni, Bi, Cs, Sc, Sn	Pb, Mo, Sr, Nb, Cd, Cu, Ni, Zr, F, Zn
Слабая Low	0,01–0,1	V, Nb, Eu, P, Mn, Al, Co, Si	Sc, V, Bi, Ni, Cs, Si, Co, Fe, Sn, Rb, Cr	Nb, Eu, P, Si, Zr, Al, Co	P, K, Fe, Co, Rb, Cr, Si, Mn, La, Zn	Ca, S, K, As, Rb, Eu, Cs, Fe, Mg, P, U, Be, Sn, Sc, Co, La
Очень слабая Very low	<0,01	Ti, Zr	Y, Th, Nb, Mn, La, Eu, Zr, Pb, Ti, Al	Ti	Ti, Al	Cr, Mn, V, Si, Th, Al, Ti

А.И. Перельман установил различия в миграции химических элементов с учетом разных геохимических обстановок, а именно, в зависимости от pH и Eh среды. В нашем случае pH вод в среднем примерно близки (7,7–8,2) и соответствуют слабощелочной и щелочной среде. Сильные отличия имеют значения Eh: в поверхностных водах – окислительная среда (от 59 до 202 мВ), в подземных – восстановительная и глеевая (от –171 до –17 мВ, за одним исключением, в роднике 211 мВ).

Ряды миграции в данном случае построены отдельно для каждого типа вод, т. е. в зависимости от этапа взаимодействия вод с вмещающими породами в направлении от поверхностных вод (реки и озера) к подземным активного и замедленного водообменов. Как видно, в каждом случае миграционная способность многих элементов может меняться, хотя и не кардинально (табл. 5). Сначала отметим общие черты.

На всех этапах хорошо выносятся из пород в воды (характеризуются очень сильной подвижностью) Na, C, Cl, I, B, что совпадает с данными А.И. Перельмана. Сильной миграцией отличаются в водах данной территории также N, Br, Sr, Cd, Cu, Li, Mo, Ge, Zn. При этом коэффициенты Cd отличаются достаточно большим разбросом 0,2–15,7 вне зависимости от pH, Eh, минерализации, немного хуже мигрируя в богатых органикой водах.

Хуже всего выносятся (очень слабая миграция) Al, Ti, а также Zr, V, Nb, Eu, Mn, Si, Cr, Co, Fe, Rb. При этом сильно (на два и более порядка) различаются по интенсивности Al ( $4 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-2}$ ), Zr ( $8 \cdot 10^{-4}$ –0,1), V ( $3 \cdot 10^{-5}$ –0,1), Nb ( $3 \cdot 10^{-4}$ –0,5), Mn ( $2 \cdot 10^{-3}$ –0,4) вне зависимости от pH, Eh и солености. Нами отмечено, что миграция Al и Mn идет тем слабее, чем выше показатель  $S_{орг}$ .

Контрастной миграцией отличаются кальций и магний. На первых этапах в зоне активного водообмена для них характерна сильная миграция (воды  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  и  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ ), затем в зоне замедленного водообмена, где состав вод становится содовым, интенсивность снижается до средней и слабой. Интересно, что также ведет себя сера, видимо, потому, что хуже мигрирует в восстановительной среде.

Сильно отличаются по содержанию в водах (рис. 7), а значит и интенсивностью миграции (табл. 5), также такие элементы, как Pb, Zn, Cu, Zr, Nb, Ag, Cd, Sn, но связи с геохимической средой опять не прослеживается.

Конечно, остаются вопросы, например, по Al и Si, концентрации которых в воде невелики относительно исходных пород, поэтому и интенсивность миграции рассчитывается как слабая и очень слабая. Несмотря на это, их много в осаждающихся глинах, которыми воды, даже речные [26], пересыщены [11]. Соответственно Al и Si должны были пройти через воду, а значит вынос их из пород достаточно сильный.

Таким образом, важно знать, какие химические элементы концентрируются вторичными минеральными фазами, и учитывать это при расчетах. Такого рода анализ позволит выделить перечень элементов, склонных к накоплению в твердой и жидкой составляющих потоков рассеяния. Особое значение эти исследования приобретают при прогнозе масштабов оруденения по гидрогеохимическим данным, когда встает необходимость учитывать масштабы перераспределения элементов в системе «вода–порода» [27].

#### Выводы

В результате проведенных исследований на Нарыкско-Осташкинской площади определены концентрации 59 химических элементов в 43 пробах поверхностных и подземных вод и 48 элементов в 3 пробах водовмещающих пород. Кратко представим некоторые полученные выводы.

1. В природных водах территории в направлении речные–озерные–подземные активного–подземные замедленного водообмена, т. е. по мере большего времени взаимодействия системы «вода–порода», возрастают как общая минерализация и содержание основных ионов, так и спектр определяемых микрокомпонентов и их концентрации.
2. Высокие уровни накопления ( $K_k > 10$ ) относительно среднего для вод умеренного климата характерны в основном для элементов подземных вод нижней части замедленного водообмена (угленосных отложений): из макрокомпонентов это C, Na, Cl, Fe, из микрокомпонентов – Ga, Ba, Li, Zr, Pb, V, Sc, Ni, Br, Rb, Sr, Nb, Mo, I, Ag, Cd, Cs, Hg. При этом, несмотря на высокие абсолютные значения

большинства компонентов, в относительных значениях от солёности часть элементов имеет самые низкие значения среди других вод: Be, Mg, Si, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Co, Cu, As, Se, Sr, Mo, Ag, Cd, Sn, Cs, Th, U.

3. Во всех природных водах территории достаточно высоким уровнем накопления отличаются Sc, Ga и Ag, в подземных водах верхней части замедленного водообмена – V и U, в зоне активного водообмена – Pb и Cs. В речных водах практически все изученные элементы характеризуются низкой концентрирующей способностью ( $K_k < 1$ ).
4. Во вмещающих породах, представленных угленосными пермскими песчаниками и алевролитами, в повышенных концентрациях относительно среднего для песчаников ( $K_k > 1,5$ ) содержатся W, Pb, Nb, Sc, Ce, Nd, Pr, Gd, Ga, La, Mg.
5. При сравнении элементов в системе «вода–порода» можно отметить, что относительно вод в породах в % отношении больше содержатся Al, Si, Be, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb, Zr, Eu, Bi, Th. В водах в повышенных концентрациях относительно пород содержатся такие элементы, как Na, C, Cl, N, в водах верхней зоны – Ca, Mg и S; из микрокомпонентов – В. Выделяются среди вод, в % соотношении относительно общей минерализации, подземные воды активного водообмена, в которых концентрации на 1–2 порядка больше, чем в породах, Cu, Ag, Cd, Sr, Sn, Sb, I, Cs, Hg, Pb.
6. Миграционная способность элементов разных типов вод если и меняется, то не кардинально, и в большинстве случаев не зависит от pH, Eh и солёности вод, иногда фиксируется связь с показателем Сорг. Во всех водах сильно подвижны Na, C, Cl, I, B, что, в принципе, отмечается и по другим регионам, а для данной территории также характерны N, Br, Sr, Cd, Cu, Li, Mo, Ge, Zn. Хуже всего выносятся Al, Ti, а также Zr, V, Nb, Eu, Mn, Si, Cr, Co, Fe, Rb.
7. Полученные данные позволяют расширить представления об общих закономерностях распределения элементов в системе «вода–порода» в условиях угольных отложений и в дальнейшем использовать их при различных экологических и поисковых исследованиях.

*Авторы выражают благодарность доценту ТПУ Ю.Г. Копыловой за бескорыстную помощь и постоянное отстаивание традиций Сибирской гидрогеохимической школы.*

*Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00127) и проекта фундаментальных научных исследования Российской академии наук №0331-2019-0026.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Do ICP-MS based methods fulfill the EU monitoring requirements for the determination of elements in our environment? / K. Tirez, C. Vanhoof, J. Bronders, N. de Brucker, F. Vanhaecke // Environmental Sciences: Processes and Impacts. – 2015. – V. 17 (12). – P. 2034–2050.

2. Trace elements concentration and distributions in coal and coal mining wastes and their environmental and health impacts in Shaanxi, China / R. Hussain, K. Luo, Z. Chao, Z. Xiaofeng // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – V. 25 (20). – P. 19566–19584.
3. Hydrogeochemistry signatures of produced waters associated with coalbed methane production in the Southern Junggar Basin, NW

- China / Z. Zhang, D. Yan, X. Zhuang, S. Yang, G. Wang, G. Li, X. Wang // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – V. 26 (31). – P. 31956–31980.
4. Produced fluids and shallow groundwater in coalbed methane (CBM) producing regions of Alberta, Canada: trace element and rare earth element geochemistry / K. Cheung, H. Sanei, P. Klassen, B. Mayer, F. Goodarzi // International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 77 (3–4). – P. 338–349.
  5. Geochemical characteristics of water produced from CBM wells and implications for commingling CBM production: a case study of the Bide-Santang Basin, western Guizhou, China / C. Guo, Y. Qin, Y. Xia, D. Ma, D. Han, Y. Chen, W. Chen, K. Jian, L. Lu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 159. – P. 666–678.
  6. Chemical characteristics and development significance of trace elements in produced water with coalbed methane in Tiefsa Basin / C. Tong, H. Huang, H. He, B. Wang // ACS Omega. – 2019. – V. 4 (17). – P. 17561–17568.
  7. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 116. – P. 104579.
  8. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Гуминовые вещества в природных водах Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 197–206.
  9. Аномальный состав изотопов углерода в подземных щелочных водах Кузбасса / С.Л. Шварцев, О.Е. Лепокурова, В.А. Пономарчук, Е.В. Домрочева, Д.А. Сизиков // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 469. – № 6. – С. 724–728.
  10. Lepokurova O.E. Mechanisms of the formation of sodium bicarbonate groundwaters in the southeast of West Siberia // Geochemistry International. – 2020. – V. 58. – № 13. – P. 1502–1529.
  11. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юга Кузбасса: изотопно-химические особенности и условия формирования // Геохимия. – 2018. – № 9. – С. 904–919.
  12. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 301 с.
  13. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
  14. Перельман А.И. Геохимия природных вод. – М.: Наука, 1982. – 152 с.
  15. Геохимические особенности природных вод Западной Сибири: микроэлементный состав / Т.А. Кремлева, Т.И. Моисеенко, В.Ю. Хорошавин, А.А. Шавнин // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. – 2012. – № 12. – С. 80–89.
  16. Редкоземельные элементы в поверхностных и подземных водах верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней и Средней Оби (Западная Сибирь) / Е.Ю. Пасечник, О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, О.Н. Владимирова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. – 2020. – Т. 32. – С. 113–127.
  17. Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace element in surface waters of European Russia and Western Siberia / T.I. Moiseenko, M.I. Dinu, N.A. Gashkina, T.A. Kremleva // Environmental Research Letters. – 2019. – V. 14. – № 6. – P. 065010.
  18. Major and trace elements in suspended matter of Western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds / I.V. Krickov, A.G. Lim, R.M. Manasyrov, S.V. Loiko, S.N. Vorobyev, O.S. Pokrovsky, V.P. Shevchenko, O.M. Dara, V.V. Gordeev // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2020. – V. 269. – P. 429–450.
  19. Микроэлементный состав подземных вод верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней Оби / Е.Ю. Пасечник, Н.В. Гусева, О.Г. Савичев, В.А. Лыготин, А.А. Балобаненко, В.А. Домаренко, О.Н. Владимирова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 54–63.
  20. Шварцев С.Л., Рассказов Н.М., Савичев О.Г. Состав и формы миграции микрокомпонентов в подземных водах бассейна среднего течения р. Томи // Геология и геофизика. – 1997. – № 12. – С. 53–59.
  21. СанПиН 2.1.4.1074-01. «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы». – М.: Минздрав России, 2002. – 103 с.
  22. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – М., 2003. – 93 с.
  23. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia / S.I. Arbutov, D.A. Spears, A.V. Vergunov, S.S. Ilenok, A.M. Mezhibor, V.P. Ivanov, N.A. Zarubina // Ore Geology Reviews. 2019. – V. 113. – P. 103073.
  24. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of north Asia (Siberia, Russian far east, north China, Mongolia and Kazakhstan) / S.I. Arbutov, S.S. Ilenok, I.Y. Chekryzhov, M.G. Blokhin, N.V. Zarubina, R.B. Finkelman, Y.Z. Sun, C.L. Zhao // International journal of Coal Geology. – 2019. – V. 206. – P. 106–120.
  25. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1978. – 288 с.
  26. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томи с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 1. – С. 36–47.
  27. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Солдатова Е.А. Подвижность химических элементов в системе вода–донные отложения // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 45–51.

Поступила: 19.11.2020 г.

#### Информация об авторах

**Лепокурова О.Е.**, доктор геолого-минералогических наук, директор, Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Домрочева Е.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 556.314

## ELEMENTAL COMPOSITION OF NATURAL WATERS AND HOST SEDIMENTS OF THE KUZBASS WITH AN ASSESSMENT OF WATER MIGRATION (ON THE EXAMPLE OF THE NARYK-OSTASHKIN AREA)

**Olesya E. Lepokurova**<sup>1,2</sup>,  
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

**Evgeniya V. Domrocheva**<sup>1</sup>,  
DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS,  
4, Academicheskoye avenue, Tomsk, 634055, Russia

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

**The relevance** of the research is related to the regional specificity of the coal deposit load and objects of the coal complex on water bodies. The data obtained make it possible to expand the understanding of the general regularities in the element's distribution in the «water – coal bearing rock» system and further use them in various ecological and exploration studies.

**The aim** of the research is to study the features of the component maximum amount distribution in the natural waters of the region and the composition of the host rocks, to estimate the rate of chemical element leaching from the rocks.

**Objects:** surface and groundwater of the Naryksko-Ostashkinskaya area in the Kemerovo region, the most promising for coalbed methane production.

**Methods:** modern methods for determining the water and rock chemical composition, including inductively coupled plasma mass spectrometry, as well as standard hydrogeochemical methods for calculating the concentration factors and water migration.

**Results.** The paper introduces the data on 59 elements, including the micro-components of rivers, lakes and groundwater of different water exchanges: active, upper part and lower part (coal bearing rocks) of passive. When the water–rock interaction time increases, the salinity and the major ion and trace element concentrations increase as well. The calculated concentration coefficients relative to the average for groundwater leaching in a moderate climate made it possible to distinguish elements with a high level of accumulation: from major components, these are C, Na, Cl, Fe and the trace elements are Ga, Ba, Li, Zr, Pb, B, Sc, Ni, Br, Rb, Sr, Nb, Mo, I, Ag, Cd, Cs, Hg. The paper introduces as well the data on 48 elements of the coal bearing sandstones and siltstones, which, together with the literature data on some other elements, made it possible to obtain interesting relationships. For example, in a percentage relative to the total salinity, groundwaters of active water exchange contain 1–2 orders of magnitude more than in rocks: Cu, Ag, Cd, Sr, Sn, Sb, I, Cs, Hg, Pb. Taking into account water and rock composition, the coefficients of water migration were calculated, the series of migration of different types of waters were compiled, which did not reveal any fundamental differences. In all natural waters, they are highly mobile: Na, C, Cl, I, B, N, Br, Sr, Cd, Cu, Li, Mo, Ge, Zn; weakly mobile: Al, Ti, Zr, V, Nb, Eu, Mn, Si, Cr, Co, Fe, Rb.

### Key words:

Surface and underground waters, macro- and micro-component composition, chemical composition of host rocks, water migration, Kuznetsk coal basin.

The authors are grateful to TPU associate professor Yu.G. Kopylova for her unselfish help and constant upholding of the Siberian hydrogeochemical school's traditions.

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 20-05-00127 and Fundamental Scientific Research Projects of the Russian Academy of Sciences, project no. 0331-2019-0026.

### REFERENCES

- Tirez K., Vanhoof C., Bronders J., De Brucker N., Vanhaecke F. Do ICP-MS based methods fulfill the EU monitoring requirements for the determination of elements in our environment? *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, 2015, vol. 17 (12), pp. 2034–2050.
- Hussain R., Luo K., Chao Z., Xiaofeng Z. Trace elements concentration and distributions in coal and coal mining wastes and their environmental and health impacts in Shaanxi, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25 (20), pp. 19566–19584.
- Zhang Z., Yan D., Zhuang X., Yang S. Wang G., Li G., Wang X. Hydrogeochemistry signatures of produced waters associated with coalbed methane production in the Southern Junggar Basin, NW China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26 (31), pp. 31956–31980.
- Cheung K., Sanei H., Klassen P., Mayer B., Goodarzi F. Produced fluids and shallow groundwater in coalbed methane (CBM) producing regions of Alberta, Canada: Trace element and rare earth element geochemistry. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 77 (3–4), pp. 338–349.
- Guo C., Qin Y., Xia Y., Ma D., Han D., Chen Y., Chen W, Jian K., Lu L. Geochemical characteristics of water produced from CBM wells and implications for commingling CBM production: a case study of the Bide-Santang Basin, western Guizhou, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 666–678.
- Tong C., Huang H., He H., Wang B. Chemical characteristics and development significance of trace elements in produced water with coalbed methane in Tiefa Basin. *ACS Omega*, 2019, vol. 4 (17), pp. 17561–17568.
- Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, 104579.
- Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Humic substances in natural waters of Naryksko-Ostashkinskaya square (Kuzbass). *Bullet of*

- the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 197–206. In Rus.
9. Shvarcev S.L., Lepokurova O.E., Ponomarchuk V.A., Domrocheva E.V., Sizikov D.A. Abnormal composition of carbon isotopes in underground alkaline waters of Kuzbass. *Doklady akademii nauk*, 2016, vol. 469, no. 6, pp. 724–728. In Rus.
  10. Lepokurova O.E. Mechanisms of the Formation of Sodium Bicarbonate Groundwaters in the Southeast of West Siberia. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 13, pp. 1502–1529.
  11. Lepokurova O.E. Soda underground water in the South of the Kuznetsk basin: isotopic and chemical characteristics and formation conditions. *Geokhimiya*, 2018, no. 9, pp. 904–919. In Rus.
  12. Grigorev N.A. *Srednee sodержание khimicheskikh elementov v gornyykh porodakh, slagayushchikh verkhnyuyu chast kontinental'noy kory* [Average content of chemical elements in rocks composing the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2009. 301 p.
  13. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
  14. Perelman A.I. *Geokhimiya prirodnykh vod* [Geochemistry of natural waters]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 152 p.
  15. Kremleva T.A., Moiseenko T.I., Horoshavin V.Yu., Shavnin A.A. Geokhimicheskie osobennosti prirodnykh vod Zapadnoy Sibiri: mikroelementny sostav [Geochemical features of natural waters of Western Siberia: trace element composition] *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopolzovanie*, 2012, no. 12, pp. 80–89.
  16. Pasechnik E.Yu., Savichev O.G., Domarenko V.A., Vladimirova O.N. Rare earth elements in surface and underground waters of the Upper hydrogeodynamic zone in the Upper and Middle Ob basin (Western Siberia). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle*, 2020, vol. 32, pp. 113–127. In Rus.
  17. Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A. Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace element in surface waters of European Russia and Western Siberia. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14, no. 6, 065010.
  18. Krickov I.V., Lim A.G., Manasyrov R.M., Loiko S.V., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S., Shevchenko V.P., Dara O.M., Gordeev V.V. Major and trace elements in suspended matter of Western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 269, pp. 429–450.
  19. Pasechnik E.Yu., Guseva N.V., Savichev O.G., Lgotin V.A., Bablanenko A.A., Domarenko V.A., Vladimirova O.N. Trace element composition of underground waters of the upper hydrogeodynamic zone in the Upper Ob basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 54–63. In Rus.
  20. Shvarcev S.L., Rasskazov N.M., Savichev O.G. Composition and forms of migration of micro-components in the underground waters of the basin of the middle course of the Tom River. *Geologiya i geofizika*, 1997, no. 12, pp. 53–59. In Rus.
  21. SanPiN 2.1.4.1074-01. *Pitevaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pitevogo vodosnabzheniya. Kontrol kachestva: sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy* [Drinking water. Hygienic requirements for the water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control: sanitary and epidemiological rules and regulations]. Moscow, Minzdrav Rossii Publ., 2002. 103 p.
  22. GN 2.1.5.1315-03. *Predelno dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obektov khozyajstvenno-pitevogo i kulturno-bytovogo vodopolzovaniya* [Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in the water of water bodies of economic, drinking and cultural water use]. Moscow, 2003. 93 p.
  23. Arbutov S.I., Spears D.A., Vergunov A.V., Ilenok S.S., Mezhibor A.M., Ivanov V.P., Zarubina N.A. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 113, 103073.
  24. Arbutov S.I., Ilenok S.S., Chekryzhov I.Y., Blokhin M.G., Zarubina N.V., Finkelman R.B., Sun Y.Z., Zhao C.L. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of north Asia (Siberia, Russian far east, north China, Mongolia and Kazakhstan). *International journal of Coal Geology*, 2019, vol. 206, pp. 106–120.
  25. Shvartsev S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergenez* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 288 p.
  26. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Composition and balance of bottom sediments of the Tom river with river waters. *Geoecology*, 2003, no. 1, pp. 36–47. In Rus.
  27. Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Soldatova E.A. Mobility of chemical elements in the water–bottom sediment system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 45–51. In Rus.

Received: 19 November 2020.

#### Information about the authors

**Olesya E. Lepokurova**, Dr. Sc., Director, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Evgeniya V. Domrocheva**, Cand. Sc., researcher, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS.

УДК 621.314.58:681.5.015

## ГОЛОМОРФНОЕ ПОГРУЖЕНИЕ КАК МЕТОД РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ОЦЕНКИ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ

Исаев Юсуп Ниязбекович<sup>1</sup>,  
isaev\_yusup@mail.ru

Кабалин Дмитрий Андреевич<sup>1</sup>,  
mitya.kabalin@gmail.com

Филипас Александр Александрович<sup>1</sup>,  
filipas@tpu.ru

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

Для эффективного решения задачи оперативно-диспетчерского управления режимами работы единой энергетической системы, ее отдельных энергосистем и энергорайонов, в частности, энергорайонов нефтедобычи, требуется выполнять расчеты установившихся режимов электрических сетей. Кроме того, наряду с расчетами установившихся режимов важными являются вопросы исследования устойчивости работы энергосети. Сходимость и скорость сходимости широко применяемых итерационных методов расчета установившихся режимов зависят от многих режимных и расчетных факторов, определяемых параметрами сети и режима, выбором исходных приближений, способом задания исходных данных. Поэтому разработка новых методов, позволяющих рассчитывать все установившиеся режимы, представляет значительный практический интерес. Одним из перспективных методов является метод голоморфного погружения. В данном методе неизвестные параметры узлов представляются в виде голоморфных функций, которые можно представить в виде степенных рядов, коэффициенты которых рассчитываются по рекуррентным выражениям и задача сводится к нахождению коэффициентов степенных рядов. В опубликованной ранее статье авторов приведено рассмотрение метода для схемы с нагрузочными узлами. Для полного корректного анализа режимов реальных энергосистем необходимо показать, как нужно вести расчет для генераторных узлов. В работе представлены рекуррентные выражения для расчета неизвестных коэффициентов голоморфных функций неизвестных параметров системы уравнений установившегося режима для нагрузочных и генераторных узлов. Полученные выражения, в отличие от предложенных в работах других авторов, являются более общими. Показан принцип формирования матричного уравнения для нахождения неизвестных коэффициентов с разделением комплексных параметров на действительную и мнимую части. Предложен способ получения сходящихся степенных рядов искоемых функций в отдельных случаях. На примере тестовой энергосистемы показано преимущество перед методом Ньютона–Рафсона. Рассматривается вопрос оценки существования решения системы уравнений установившегося режима для многоузловой сети на основе сима-графика. Предложен подход к определению показателя запаса статической устойчивости энергосистемы на основе критерия Фабри.

**Цель:** применить аналитический метод голоморфного погружения для расчета электрической схемы, содержащей нагрузочные и генераторные узлы; оценить влияние количества рассчитываемых коэффициентов степенных рядов на точность полученного решения, а также рассмотреть способы повышения численной точности решения, рассмотреть вопрос оценки существования решения системы уравнений установившегося режима для многоузловой сети на основе анализа степенных рядов.

**Методы:** разложение Тейлора, аналитическое продолжение, аппроксимация Паде, решение алгебраических уравнений рекуррентным методом.

**Результаты.** На примере схемы с плохообусловленной матрицей Якоби, в которой метод Ньютона–Рафсона не сходится с плоского старта, показано преимущество метода голоморфного погружения. Показано влияние количества членов степенных рядов на погрешность расчета. Для рассматриваемой схемы выполнена графическая оценка существования решения системы уравнений.

**Выводы.** Для нагрузочных и генераторных узлов неизвестные параметры можно представить в виде голоморфных функций, которые можно записать в виде ряда Тейлора, коэффициенты которого рассчитываются по рекуррентным выражениям. Частичный учет шунтов на землю в диагональных элементах матрицы последовательных проводимостей позволяет получить сходящиеся степенные ряды в отдельных случаях. Рассмотренный графический способ оценки возможности существования режима позволяет произвести примерную оценку. В отличие от классических итерационных методов для метода голоморфного погружения не нужно задавать начальное приближение.

### Ключевые слова:

Энергосистема, установившийся процесс, устойчивость, нелинейные уравнения, голоморфное погружение, разложение Паде, сходимость.

### Введение

Распределительные электрические сети нефтегазовых месторождений выполняются, как правило, радиальными, при этом для них характерно: наличие

большого числа ступеней напряжений и ступеней трансформации; большое количество как длинных, так и коротких линий электропередачи разных уровней напряжения, большое количество линий электро-

передачи, активные составляющие сопротивлений которых близки или превышают по значению реактивные составляющие сопротивлений; высокая неоднородность нагрузки в узлах, заключающаяся в том, что нагрузка в одних узлах может составлять несколько киловатт, в других – десятки мегаватт; сильная нагруженность сети; практическое отсутствие узлов с фиксированным модулем напряжения [1–5]. Отмеченные особенности распределительных электрических сетей нефтегазовых месторождений влияют на матрицы собственных и взаимных проводимостей и матрицу Якоби, существенно ухудшая их обусловленность, и как следствие влияют на сходимость классических итерационных методов расчета установившихся режимов (УР), в частности, на сходимость метода Ньютона–Рафсона, который в настоящее время широко применяется при анализе режимов электроэнергетических систем [1, 2].

Так как для эффективного решения задачи оперативно-диспетчерского управления режимами работы единой энергетической системы в целом, ее отдельных энергосистем и энергорайонов, в частности, энергорайонов нефтедобычи, требуется получение однозначного ответа о возможности существования режима, реализация новых методов, которые позволят рассчитывать все установившиеся режимы, представляет значительный практический интерес. Кроме того, наряду с расчетами УР важными являются вопросы исследования устойчивости работы энергосети, т. к. нарушения устойчивости приводят к торможению и отключению электроприемников объектов нефтегазовой отрасли [5, 6]. Поэтому работа посвящена расчету УР электрических сетей и вопросам устойчивости функционирования энергосети.

На протяжении нескольких десятилетий ведется разработка новых методов расчета установившихся режимов. Разработаны методы по параметру, а также различные минимизационные методы, основанные на методе Ньютона (метод Левенберга–Марквардта и т. п.) [1–5, 7]. Разработанные методы надежнее по сходимости, чем метод Ньютона–Рафсона. При этом в большинстве случаев их использование позволяет получить решение, когда классический метод Ньютона–Рафсона расходится по тем или иным причинам. Однако их использование все же не всегда гарантирует получение однозначного ответа о существовании режима [7]. Кроме того, данные методы в вычислительном плане более затратные. Поэтому вопрос создания более совершенных методов и алгоритмов расчета режимов электрических систем остается актуальным.

В течение последних нескольких лет ведется активная разработка нового метода голоморфного погружения, предложенного испанским исследователем Антонио Триасом [8, 9]. Данный неитерационный метод основан на теории комплексного анализа и аналитического продолжения. Важной особенностью данного метода является однозначность решения: метод теоретически гарантированно сходится к решению независимо от начального приближения [8, 9].

В статье [10] была описана идея метода, рассмотрены вопросы анализа оценки расчетной устойчивости на примере двухузловой схемы, а также приведен пример использования метода голоморфного погружения для трехузловой схемы, содержащей только узлы нагрузки. Поскольку в математических моделях реальных энергосистем кроме нагрузочных узлов имеются генераторные узлы, то для полного корректного анализа режимов реальных энергосистем необходимо их обязательно учитывать, так как они значительно влияют на режим, в частности, при расчете предельных режимов.

#### Уравнения установившегося режима

Установившийся режим ЭЭС в общем случае описывается системой нелинейных уравнений узловых напряжений (УУН) [1–5]. Одной из возможных форм записи УУН является форма в виде баланса токов.

Для нерегулируемых узлов (узлы PQ-типа), в которых активная и реактивная мощности заданы постоянными величинами, УУН можно записать следующим образом:

$$\sum_{j=0}^{N-1} Y_{ij} U_j = \frac{S_i^*}{U_i} - Y_{i0} U_0, \quad (1)$$

где \* – знак сопряжения;  $Y_{ij}$  – элементы матрицы узловых проводимостей;  $S_i = S_{Ti} - S_{Ni}$  – результирующая комплексная мощность, входящая в  $i$ -й узел;  $U_i$  – напряжение узла  $i$ ;  $Y_{i0}$  – взаимная проводимость между узлом  $i$  и балансирующим;  $U_0$  – напряжение балансирующего узла;  $N$  – количество узлов в схеме.

Для регулируемых узлов (узлы PV-типа), в которых задается активная мощность, модуль напряжения и диапазон регулирования реактивной мощности, систему УУН переписывают следующим образом:

$$\sum_{j=0}^{N-1} Y_{ij} U_j = \frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} - Y_{i0} U_0, \quad i \in PV, \quad (2)$$

где активная мощность  $P_i$  является постоянной известной величиной, реактивная мощность  $Q_i$  является неизвестной переменной, которая определяется в процессе расчета.

Дополнительно для узлов PV-типа используют уравнения, связывающие комплекс напряжения в узле с его модулем:

$$|U_i|^2 = |U_{зди}|^2 = U_i U_i^*, \quad i \in PV. \quad (3)$$

Модуль и фазовый угол напряжения балансирующего (базисного) узла задается, при этом фазовый угол обычно принимается равным нулю:

$$U_0 = U_{зди}, \quad i \in б.у. \quad (4)$$

Задача расчета УР сводится к решению системы уравнений (1)–(4), решением которой являются комплексы напряжений в узлах сети. На основе полученных напряжений рассчитываются остальные параметры режима электрической сети – перетоки и токи в ветвях и т. д.

Критерием получения решения является условие соблюдения небалансов мощности в узлах сети:



$$\max \left( \left| P_i - P_{i\text{расч}} \right|; \left| Q_i - Q_{i\text{расч}} \right| \right) \leq \varepsilon,$$

где  $P_i$  и  $Q_i$  – узловая активная и реактивная мощность  $i$ -го узла соответственно;  $P_{i\text{расч}}$  и  $Q_{i\text{расч}}$  – расчетная узловая активная и реактивная мощность  $i$ -го узла соответственно;  $\varepsilon$  – заданная допустимая погрешность по мощности, допустимое значение  $\varepsilon = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ .

#### Голоморфное погружение уравнений установившегося режима в комплексную плоскость

Рассмотрим применение метода голоморфного погружения для решения системы УУН в форме баланса токов. Осуществляем голоморфное погружение уравнений в комплексную плоскость. Голоморфное погружение заключается во введении в исходную систему алгебраических уравнений комплексного параметра  $\alpha$  таким образом, что [8]:

- напряжения и реактивная мощность генераторных узлов представляются в виде функций от этого комплексного параметра  $\alpha$ , при этом данные функции  $f(\alpha)$  должны быть голоморфны. Кроме того, комплексно-сопряженные функции напряжений также должны быть голоморфными. Для этого эти функции должны удовлетворять условию Коши–Римана [9]

$$\frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha^*} = 0 \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x} \end{cases}, \quad (5)$$

$$f(\alpha) = u(x, y) + jv(x, y), \quad \alpha = x + jy.$$

Голоморфные функции определены на открытом подмножестве комплексной плоскости  $\alpha$  и комплексно дифференцируемы в каждой точке этого подмножества. Голоморфные функции являются аналитическими и могут быть представлены в виде сходящегося в некоторой окрестности каждой точки ряда Тейлора [9]. Данное свойство голоморфных функций очень важно в предлагаемом методе.

- при подстановке параметра погружения  $\alpha=0$  в «погруженную» систему уравнений данная нелинейная система должна преобразовываться в линейную, математически точное решение которой может быть определено. При  $\alpha=0$  система соответствует сети без нагрузки и генерации (все инъекции узловых мощностей исчезают). При  $\alpha=1$  система уравнений соответствует исходной системе алгебраических уравнений.

В общем голоморфное погружение комплексного параметра  $\alpha$  в исходную систему алгебраических уравнений может быть выполнено любым способом, чтобы выполнялись описанные требования [8].

Следует отметить, что поскольку задача в дальнейшем сводится к работе со степенными рядами, то для получения сходящихся рядов, а также чтобы первые коэффициенты функций напряжений были равны (или близки) единице в ситуации без нагрузки и генерации при  $\alpha=0$ , необходимо разделить матрицу проводимости  $Y$  на матрицу последовательных проводи-

мостей  $Y_n$  и матрицу шунтов  $Y_{ш}: Y = Y_n + \text{diag}(Y_{ш})$  [10]. Тогда правую часть в (1) и (2) можно представить в следующем виде:

$$\sum_{j=0}^{N-1} Y_{ij} U_j = \sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij} U_j + Y_{шi} U_i, \quad (6)$$

где  $Y_{шi}$  – суммарная проводимость на землю узла  $i$ ;  $Y_{nij}$  – элементы матрицы последовательных проводимостей (матрица узловых проводимостей, в диагональных элементах которой не учитываются проводимости на землю).

Применяя описанные правила голоморфного погружения, а также учитывая (6), голоморфное погружение может быть представлено в следующем виде:

$$\sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij} U_j(\alpha) = \frac{\alpha S_i^*}{U_i^*(\alpha^*)} - \alpha Y_{шi} U_i(\alpha) - Y_{шi} U_{ш}(\alpha), \quad i \in PQ, \quad (7)$$

$$\sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij} U_j(\alpha) = \frac{\alpha P_i - jQ_i(\alpha)}{U_i^*(\alpha^*)} - \alpha Y_{шi} U_i(\alpha) - Y_{шi} U_{ш}(\alpha), \quad i \in PV, \quad (8)$$

$$U_i(\alpha) U_i^*(\alpha^*) = |U_{i0}|^2 + \alpha |U_{3di}|^2 - |U_{i0}|^2, \quad i \in PV, \quad (9)$$

$$U_{ш}(\alpha) = 1 + \alpha(U_{ш} - 1), \quad (10)$$

где  $\alpha$  – параметр погружения;  $U_{3di}$  – заданное напряжение узла,  $P_i = P_{гi} - P_{шi}$  и  $Q_i = Q_{гi} - Q_{шi}$  – активная и реактивная мощность, входящая в  $i$ -й узел;  $U_i(\alpha)$  и  $Q_i(\alpha)$  – голоморфные функции напряжения и реактивной мощности от параметра  $\alpha$ ;  $U_i^*(\alpha^*)$  – голоморфная комплексно-сопряженная функция напряжения,  $U_{ш}$  – расчетное напряжение  $i$ -го генераторного узла при подстановке в (7) и (8) параметра погружения  $\alpha=0$ . Голоморфные функции могут быть представлены в виде сходящегося в некоторой окрестности каждой точки ряда Маклорена, который является частной формой ряда Тейлора [9]:

$$U_i(\alpha) = \sum_{i=0}^n U_i[n] \alpha^n = U_i[0] + U_i[1] \alpha + \dots + U_i[n] \alpha^n, \quad i \in PQ + PV + \text{б.у.} \quad (11)$$

$$Q_i(\alpha) = \sum_{i=0}^n Q_i[n] \alpha^n = Q_i[0] + Q_i[1] \alpha + \dots + Q_i[n] \alpha^n, \quad i \in PV. \quad (12)$$

Следует заметить, что в формулах (7) и (8) комплексно-сопряженная функция напряжения представ-

лена в виде  $U_i^*(\alpha^*) = \sum_{i=0}^n U_i^*[n] \alpha^n$ , а не в виде

$$U_i^*(\alpha^*) = \sum_{i=0}^n U_i^*[n] (\alpha^*)^n, \quad \text{так как именно функция}$$

$U_i^*(\alpha^*)$  удовлетворяет условию Коши–Римана (5).

Введем вспомогательную функцию  $W_i^*(\alpha^*)$ , обратную  $U_i^*(\alpha^*)$  которую также можно разложить в степенной ряд:

$$W_i^*(\alpha^*) = \frac{1}{U_i^*(\alpha^*)} = W_i^*[0] + W_i^*[1]\alpha + \dots + W_i^*[n]\alpha^n. \quad (13)$$

Неизвестные коэффициенты функции  $W_i^*(\alpha^*)$  можно найти из равенства  $W_i^*(\alpha^*) \cdot U_i^*(\alpha^*) = 1$ . Далее знак сопряжения опускаем. Расписав функции в виде рядов, открыв скобки и приравняв коэффициенты при одинаковых степенях параметра  $\alpha$  с обеих сторон уравнения, получаем общее выражение для вычисления  $n$ -го коэффициента ряда функции  $W(\alpha)$  [11–16]:

$$W[n] = \begin{cases} \frac{1}{U[0]}, & n = 0; \\ -\frac{\sum_{k=0}^{n-1} W[k]U[n-k]}{U[0]}, & n \geq 1. \end{cases}$$

Подставляем (10)–(13) в (7) и (8), получаем уравнения

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij}(U_j[0] + U_j[1]\alpha + \dots + U_j[n]\alpha^n) = \\ = \alpha S_i^*(W^*[0] + W^*[1]\alpha + \dots + W^*[n]\alpha^n) - \\ - \alpha Y_{\text{ш}i}(U_i[0] + U_i[1]\alpha + \dots + U_i[n]\alpha^n) - \\ - Y_{i\sigma}(1 + \alpha(U_{\sigma} - 1)), \quad i \in PQ, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij}(U_j[0] + U_j[1]\alpha + \dots + U_j[n]\alpha^n) = \\ = (\alpha P_i - j(Q[0] + Q[1]\alpha + \dots + Q[n]\alpha^n)) \times \\ \times (W_i^*[0] + W_i^*[1]\alpha + \dots + W_i^*[n]\alpha^n) - \\ - \alpha Y_{\text{ш}i}(U_i[0] + U_i[1]\alpha + \dots + U_i[n]\alpha^n) - \\ - Y_{i\sigma}(1 + \alpha(U_{\sigma} - 1)) \quad i \in PV. \end{aligned} \quad (15)$$

Раскрывая скобки в (14) и (15) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях  $\alpha^n$ , получаем:

- для узлов  $PQ$ -типа:

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij}U_j[n] = \\ = \begin{cases} -Y_{i\sigma}, & n = 0; \\ S_i^*W^*[n-1] - Y_{\text{ш}i}U_i[n-1] - Y_{i\sigma}(U_{\sigma} - 1), & n = 1; \\ S_i^*W_i^*[n-1] - Y_{\text{ш}i}U_i[n-1], & n > 1; \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

- для узлов  $PV$ -типа:

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij}U_j[n] = \\ = \begin{cases} -jQ[0]W_i^*[0] - Y_{i\sigma}, & n = 0; \\ P_iW_i^*[0] - j(Q[0]W_i^*[1] + Q[1]W_i^*[0]) - \\ - Y_{\text{ш}i}U_i[0] - Y_{i\sigma}(U_{\sigma} - 1), & n = 1; \\ P_iW_i^*[n-1] - \\ - j\sum_{k=0}^n Q_i[k]W_i^*[n-k] - Y_{\text{ш}i}U_i[n-1], & n > 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

Из уравнений (16) и (17) видно, что исходная задача сводится к нахождению коэффициентов степенных рядов. При этом мы можем точно определить нулевые коэффициенты степенных рядов напряжений и неизвестных реактивных мощностей. Уравнения (16) и (17) при  $n=0$  соответствуют подстановке в «погруженную» систему уравнений параметра  $\alpha=0$ . Нулевые коэффициенты реактивных мощностей  $Q_j[0]=0, j \in PV$ , так как при  $\alpha=0$  инъекции мощности генерации отсутствуют. Нулевые коэффициенты степенных рядов напряжений определяются путем решения уравнения

$$\sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij}U_j[0] = -Y_{i\sigma}, \quad j \in PQ + PV.$$

В случае если в матрице последовательных проводимостей диагональные элементы не содержат шунтов на землю (даже шунтов трансформаторных ветвей П-образной схемы замещения) и равны сумме проводимостей ветвей, связанных с соответствующим узлом, с обратным знаком, тогда нулевые коэффициенты степенных рядов напряжений равны единице:  $U_i[0]=1, j \in PQ + PV + \sigma$ . Если же в диагональных элементах матрицы последовательных проводимостей частично учесть шунты на землю (с целью получения сходящихся степенных рядов в отдельных случаях), то нулевые коэффициенты степенных рядов напряжений  $U_i[0] \neq 1$ , а являются комплексными числами, действительная часть которых близка к 1. В отличие от [12–16], где предлагается полностью выделять шунты на землю из диагональных элементов матрицы узловых проводимостей и принимать  $U_i[0]=1$ , предложенный способ частичного учета шунтов на землю и расчета нулевых коэффициентов степенных рядов неизвестных позволяет получить сходящиеся степенные ряды в отдельных случаях, тем самым получить корректный результат.

Зная нулевые коэффициенты степенных рядов, можно рассчитать остальные коэффициенты. Для узлов  $PQ$ -типа из (16) видно, что неизвестные  $n$ -ые коэффициенты функций напряжений  $U_i(\alpha)$  можно вычислить через известные  $(n-1)$ -е коэффициенты по рекуррентному выражению. Для узлов  $PV$ -типа из (17) видно, что при вычислении коэффициента  $n$ -го порядка степенного ряда напряжения  $U_j[n]$  требуются коэффициенты  $n$ -го порядка  $W_i^*[n]$  и  $Q_i[n]$ . Так как коэффициенты  $Q_j[n]$  являются искомыми, то перенесем их в правую часть выражения (17), учитывая  $Q_i[0]=0$ , получаем

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{N-1} Y_{nij}U_j[n] + jQ_i[n]W_i^*[0] = \\ = \begin{cases} -Y_{i\sigma}, & n = 0; \\ P_iW_i^*[0] - Y_{\text{ш}i}U_i[0] - Y_{i\sigma}(U_{\sigma} - 1), & n = 1; \\ P_iW_i^*[n-1] - \\ - j\sum_{k=1}^{n-1} Q_i[k]W_i^*[n-k] - Y_{\text{ш}i}U_i[n-1], & n > 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

В уравнении (18) нам удалось избавиться от неизвестного коэффициента  $W_i^*[n]$ , который не может быть найден без  $U_i[n]$ . Однако в уравнении (18) у нас две неизвестные переменные –  $Q_i$  и  $U_i$ . Для того чтобы найти решение, необходимо дополнить систему уравнений уравнением (9). Представим уравнение (9) следующим образом

$$\begin{aligned} & (U_i[0] + U_i[1]\alpha + \dots + U_i[n]\alpha^n) \times \\ & \times (U_i^*[0] + U_i^*[1]\alpha + \dots + U_i^*[n]\alpha^n) = \\ & = |U_{i0}|^2 + \alpha(|U_{3li}|^2 - |U_{i0}|^2), \quad i \in PV. \end{aligned} \quad (19)$$

где  $U_{i0} = U_i[0]$  – расчетное напряжение  $i$ -го генераторного узла при  $\alpha=0$ .

Перемножив скобки в правой части выражения (19) и приравняв коэффициенты при одинаковых степенях параметра  $\alpha$ , получаем

$$\begin{aligned} & U_i[0] \cdot U_i^*[n] + U_i[n] \cdot U_i^*[0] = \\ & = \begin{cases} |U_{3li}|^2 - |U_{i0}|^2, & n=1; \\ -\sum_{k=1}^{n-1} U_i[k] U_i^*[n-k], & n>1 \end{cases}, \quad i \in PV, \end{aligned} \quad (20)$$

Выражения (16), (18) и (20), на основе которых можно найти  $n$ -е члены степенных рядов функций искомым величин, содержат комплексные переменные, что затрудняет задачу нахождения решения. Выделим действительную и мнимую части в данных уравнениях. Для этого элементы матрицы проводимостей представим в виде  $Y_{nij} = g_{nij} + jb_{nij}$ ,  $n$ -е коэффициенты функций  $U_i(\alpha)$  и  $W_i(\alpha)$  –  $U_j[n] = U_j'[n] + jU_j''[n]$ ,  $W_j[n] = W_j'[n] + jW_j''[n]$  соответственно. Введем обозначение, запишем правые части выражений (16), (18) и (20) как  $I_{PQi}[n-1]$ ,  $I_{PVi}[n-1]$  и  $UU_i^*[n-1]$  соответственно.

Для узлов PQ-типа систему уравнений (16) можно представить в виде двух уравнений

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{N-1} (g_{nij} U_j'[n] - b_{nij} U_j''[n]) = I'_{PQi}[n-1], \quad i \in PQ; \\ & \sum_{j=0}^{N-1} (b_{nij} U_j'[n] + g_{nij} U_j''[n]) = I''_{PQi}[n-1], \quad i \in PQ, \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} & I'_{PQi}[n-1] = \text{Re}(I_{PQi}[n-1]) \\ & \text{и } I''_{PQi}[n-1] = \text{Im}(I_{PQi}[n-1]) \end{aligned}$$

– действительная и мнимая части  $I_{PQi}[n-1]$ .

Для узлов PV-типа систему уравнений (18) можно представить в виде двух уравнений

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{N-1} (g_{nij} U_j'[n] - b_{nij} U_j''[n]) + W_i'[0] \cdot Q_i[n] = \\ & = I'_{PVi}[n-1], \quad i \in PV; \\ & \sum_{j=0}^{N-1} (b_{nij} U_j'[n] + g_{nij} U_j''[n]) + W_i''[0] \cdot Q_i[n] = \\ & = I''_{PVi}[n-1], \quad i \in PV, \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$I'_{PVi}[n-1] = \text{Re}(I_{PVi}[n-1])$$

$$\text{и } I''_{PVi}[n-1] = \text{Im}(I_{PVi}[n-1])$$

– действительная и мнимая части  $I_{PVi}[n-1]$ .

Правую часть выражения (20) можно представить через мнимые и действительные части коэффициентов:

$$\begin{aligned} & U_i[0] \cdot U_i^*[n] + U_i[n] \cdot U_i^*[0] = (U_j'[0] + jU_j''[0]) \times \\ & \times (U_j'[n] - jU_j''[n]) + (U_j'[n] + jU_j''[n]) \times \\ & \times (U_j'[0] - jU_j''[0]) = 2(U_i'[0]U_i''[n] + U_i''[0]U_i'[n]). \end{aligned} \quad (23)$$

На основе выражений (21)–(23) можно составить общее линейное матричное уравнение, позволяющее рассчитать  $n$ -ые члены действительных и мнимых частей функций  $U_i(\alpha)$  и  $Q_i(\alpha)$ . После перестановки уравнений местами общее линейное матричное уравнение, позволяющее определить  $n$ -е члены при  $n \geq 1$ , имеет вид

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} g_{nqq} & g_{nqv} & -b_{nqq} & -b_{nqv} & 0 \\ g_{nvq} & g_{nvv} & -b_{nvq} & -b_{nvv} & W_v''[0] \\ b_{nqq} & b_{nqv} & g_{nqq} & g_{nqv} & 0 \\ b_{nvq} & b_{nvv} & g_{nvq} & g_{nvv} & W_v'[0] \\ 0 & U_v'[0] & 0 & U_v''[0] & 0 \end{bmatrix} \times \\ & \times \begin{bmatrix} U_q'[n] \\ U_v''[n] \\ U_q''[n] \\ U_v'[n] \\ Q_v[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_{PQq}[n-1] \\ I'_{Pvq}[n-1] \\ I''_{PQq}[n-1] \\ I''_{Pvq}[n-1] \\ \frac{1}{2} UU_v^*[n-1] \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (24)$$

Общее количество уравнений в линейной системе (24) равно  $2n_{PQ} + 3n_{PV}$ , где  $n_{PQ}$  – количество узлов PQ-типа в схеме,  $n_{PV}$  – количество узлов PV-типа в схеме. В системе (24) индекс  $q \in PQ$ , а индекс  $v \in PV$ . Для решения представленной системы линейных алгебраических уравнений необходимо использовать LU-разложение. Стоит отметить, что матрица коэффициентов в системе (24) является неизменной и ее разложение выполняется только один раз, в отличие от метода Ньютона, где факторизация матрицы Якоби осуществляется на каждой итерации расчета.

#### Аналитическое продолжение и аппроксимация Паде

Значительную роль в методе голоморфного погружения занимает аналитическое продолжение степенного ряда. В общем случае после вычисления достаточного количества членов степенного ряда, для того чтобы найти решение УУР, необходимо рассчитать значения полученных функций при  $\alpha=1$ . Подставляя в (11) и (12) значение параметра, получаем, что расчетные значения искомым величин определяются как сумма рассчитанных коэффициентов:

$$U_i = \sum_{i=0}^n U_i[n] \quad \text{и} \quad Q_i = \sum_{i=0}^n Q_i[n]. \quad \text{Это возможно, если}$$

радиус сходимости степенных рядов будет больше 1. Если данное условие не будет выполняться, то, для того чтобы определить значение функции за пределами радиуса сходимости, применяется аналитическое продолжение. Аналитическое продолжение – это процесс, посредством которого голоморфная функция, определённая в некоторой области пространства, расширяется за пределы этой области (рис. 1). В качестве аналитического продолжения используется аппроксимация Паде, т. к. из теории сходимости Штала диагональные аппроксимации Паде дают максимальное аналитическое продолжение [8, 17–21].



**Рис. 1.** Радиус сходимости исходного степенного ряда и соответствующей аппроксимации Паде  
**Fig. 1.** Convergence radius of the original power series and the corresponding Padé approximants

Аппроксимация Паде представляет собой функцию в виде отношения двух полиномов [17–19]:

$$U(\alpha) = \sum_{n=0}^{L+M} U[n]\alpha^n = \left[ \frac{L}{M} \right]_{U(\alpha)} = \frac{a(\alpha)}{b(\alpha)} = \frac{a[0] + a[1]\alpha + a[2]\alpha^2 + \dots + a[L]\alpha^L}{b[0] + b[1]\alpha + b[2]\alpha^2 + \dots + b[M]\alpha^M}, \quad (25)$$

где  $n$  – степень исходного степенного ряда;  $L$  и  $M$  – порядок степени полинома числителя и знаменателя соответственно, при этом  $n=L+M$ . По условию теоремы Штала [20, 21], наилучшая сходимость обеспечивается, если степени полиномов числителя и знаменателя одинаковы, то есть  $L=M$ . Такой вид разложения Паде называется диагональным. Основное преимущество аппроксимации Паде состоит в том, что она обеспечивает хорошее приближение вне радиуса сходимости степенного ряда, а также ускоряет сходимость.

Коэффициенты полиномов числителя и знаменателя аппроксимации Паде определяются через найденные ранее коэффициенты степенных рядов функций. Существуют разные способы вычисления аппроксимации Паде. Одним из наиболее простых является матричный способ [17].

Умножая обе стороны (25) на  $b(\alpha)$ , получаем соотношение

$$(b[0] + b[1]\alpha + \dots + b[M]\alpha^M) \times (U[0] + U[1]\alpha + \dots + U[L+M]\alpha^{L+M}) = a[0] + a[1]\alpha + \dots + a[L]\alpha^L.$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях  $\alpha^n$ , получаем систему уравнений:

$$\begin{array}{l} 1 \\ \alpha \\ \vdots \\ \alpha^L \\ \hline \alpha^{L+1} \\ \alpha^{L+2} \\ \vdots \\ \alpha^{L+M} \end{array} \begin{array}{l} a[0] = b[0]U[0] \\ a[1] = b[1] \cdot U[0] + b[0] \cdot U[1] \\ \vdots \\ a[L] = b[L]U[0] + b[L-1] \times \\ \quad \times U[1] + \dots + b[0]U[L] \\ \hline 0 = b[M]U[L-M+1] + b[M-1] \times \\ \quad \times U[L-M+2] + \dots + b[0]U[L+1] \\ 0 = b[M]U[L-M+2] + b[M-1] \times \\ \quad \times U[L-M+3] + \dots + b[0]U[L+2] \\ \vdots \\ 0 = b[M]U[L] + b[M-1] \times \\ \quad \times U[L+1] + \dots + b[0]U[L+M]. \end{array} \quad (26)$$

Система (26) состоит из  $L+M+1$  уравнений и имеет  $L+M+2$  неизвестных ( $a[0], a[1], \dots, a[L], b[0], b[1], \dots, b[L]$ ). Поэтому принимается  $b[0]=1$ . Из уравнений при  $\alpha^{L+1}, \alpha^{L+2}, \dots, \alpha^{L+M}$  можно определить неизвестные коэффициенты полинома знаменателя  $b[1], b[2], \dots, b[M]$ . Для этого решается система  $M$  линейных уравнений с  $M$  неизвестными коэффициентами знаменателя

$$\begin{pmatrix} U[L-M+1] & U[L-M+2] & \dots & U[L] \\ U[L-M+2] & U[L-M+3] & \vdots & U[L+1] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ U[L] & U[L+1] & \dots & U[L+M-1] \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b[M] \\ b[M-1] \\ \vdots \\ b[1] \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} U[L+1] \\ U[L+2] \\ \vdots \\ U[L+M] \end{pmatrix}. \quad (27)$$

или

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B},$$

где  $U[i]$  – комплексные коэффициенты степенного ряда,  $i=0, 1, 2, \dots, L+M$ .

В (27) матрица коэффициентов, в зависимости от параметров режима, может быть плохо обусловленной, поэтому задачу расчета неизвестных коэффициентов полинома знаменателя можно назвать некорректной задачей, а решаемое в данном случае уравнение – некорректным алгебраическим уравнением. Для подавления ошибки, появляющейся при вычислении вектора коэффициентов  $\mathbf{X}$ , за счет проявления ложной высокочастотной составляющей, необходимо осуществить слабый спектральный сдвиг в выражении (27):

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^* \mathbf{A} + \lambda \mathbf{E})^{-1} \mathbf{A}^* \mathbf{B}, \quad (28)$$

где  $\mathbf{E}$  – единичная матрица;  $\lambda$  – параметр регуляризации. В нашем случае параметр регуляризации был выбран  $\lambda=10^{-25} \dots 10^{-10}$  [22].

Определив коэффициенты полинома знаменателя, можно найти коэффициенты полинома числителя  $a[0], a[1], a[2], \dots, a[L]$  сравнением коэффициентов при  $1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^L$ . Формула для определения коэффициентов полинома числителя:

$$a[L] = \sum_{k=0}^L b[k] \cdot U[L-k].$$

Таким образом, определив коэффициенты полиномов числителя и знаменателя аппроксимации Паде, путем подстановки  $\alpha=1$  в (25), мы можем вычислить искомое значение напряжения в  $i$ -м узле:

$$U_i = \sum_{n=0}^L a_i[n] / \sum_{n=0}^L b_i[n].$$

### Применение метода голоморфного погружения на тестовых схемах

Для проверки метода использовались 14-, 30-, 118-, 145-, 300-узловые тестовые схемы IEEE. При этом результаты расчета УР сравнивались с результатами,

получаемыми методом Ньютона–Рафсона. Для всех этих схем результаты расчета УР методом голоморфного погружения совпал с результатами, полученными методом Ньютона–Рафсона.

Чтобы показать преимущество рассматриваемого метода голоморфного погружения, рассмотрим схему электрической сети, состоящую из 22 узлов и 22 ветвей и представленную на рис. 2. В рассматриваемой схеме один узел  $PV$ -типа, двадцать узлов  $PQ$ -типа, базисным (балансирующим) является узел 1. На рис. 2: над ветвями линий приведено сопротивление  $Z_{л}=R+jX$ , под – проводимость на землю  $B_c$  (положительное значение  $B_c$  соответствует емкости); над трансформаторными ветвями приведено сопротивление  $Z_{тр}=R+jX$ , под – коэффициент трансформации  $K_{тр}$ . Все параметры приведены в о.е. Мощности нагрузки и генерации приведены к базисной величине  $S_{баз}=100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ . Номинальное напряжение узлов 1–4, 20 составляет 220 кВ; узлов 5–18, 21 – 110 кВ; узла 22 – 35 кВ; узла 19 – 6 кВ.

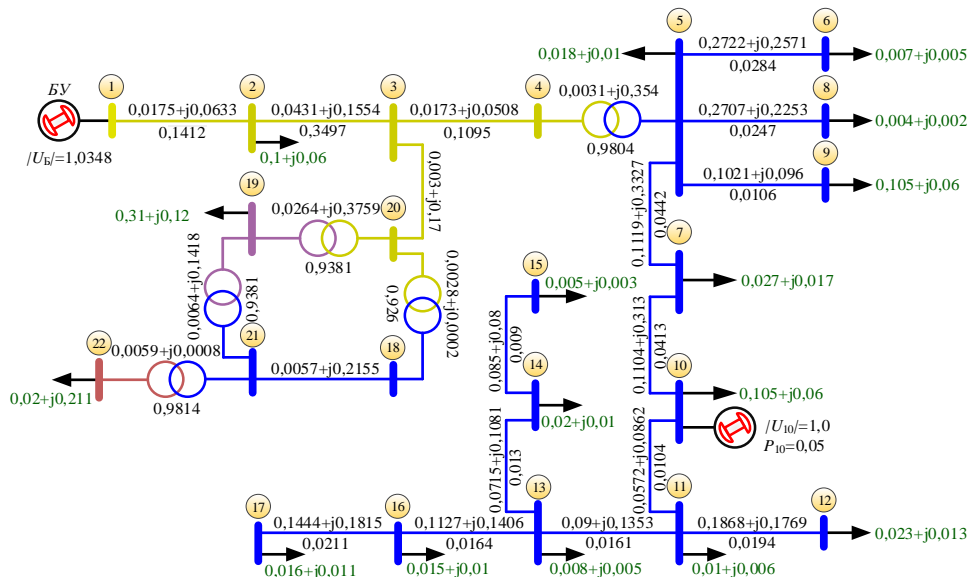


Рис 2. Тестовая схема электрической сети  
Fig. 2. Test circuit of the electrical power system

При выполнении расчета УР методом Ньютона–Рафсона с плоского старта ( $U_i = U_{ном i}$ ), итерационный процесс не сходится. При этом решение имеет колебательный характер. При этом якобиан на отдельных итерациях меняет знак, что говорит о том, что процесс уже не сойдется к решению [3]. Для данной схемы на сходимость итерационного процесса огромное влияние оказало неудачное начальное приближение. Выполнив подбор начального приближения или применив «стартовый алгоритм» [1], удастся получить устойчивое решение.

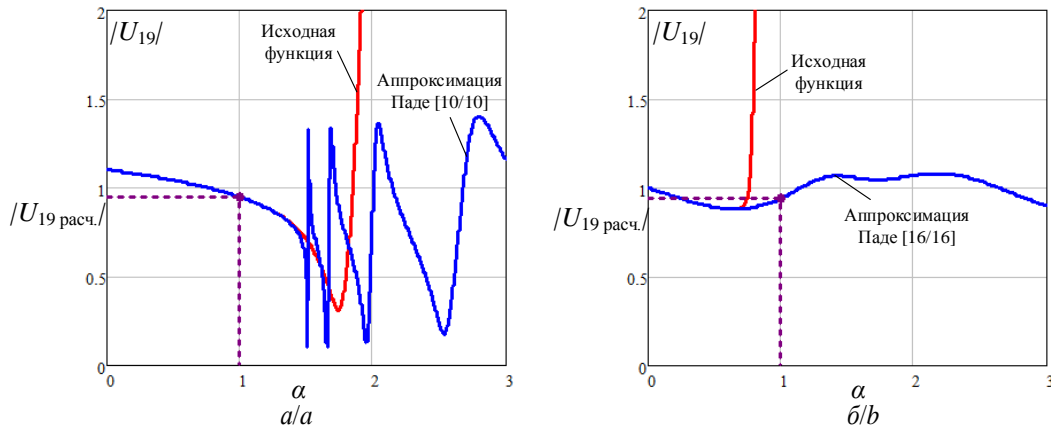
Расчет УР методом голоморфного погружения выполним двумя способами: первый способ – в векторе шунтов  $Y_{ш}$  не будем учитывать шунты на землю схем замещения трансформаторных ветвей, второй способ – в векторе шунтов  $Y_{ш}$  учитываются все суммар-

ные шунты на землю. При расчете получилось, что итоговые значения напряжений в узлах сети совпадают и соответствуют значениям, полученным методом Ньютона–Рафсона с подобранным начальным приближением. Однако результаты расчета коэффициентов степенных рядов отличаются: в первом случае получаются сходящиеся ряды, во втором – расходящиеся. Несмотря на то, что во втором случае ряды расходящиеся, применение аппроксимации Паде позволило получить решение, но при этом погрешность по мощности в узлах больше. На рис. 3 представлен график степенного ряда напряжения и соответствующая ему аппроксимация Паде для узла 19. Отметим, что в первом случае аналитическое продолжение путем рациональной аппроксимации Паде не требуется, поскольку все степенные ряды уже сходятся при  $\alpha=1$ .

Однако аппроксимации Паде намного эффективнее оценивают эти функции, поскольку они сходятся к решению с гораздо большей скоростью, чем исходный степенной ряд.

При расчете вторым способом получен правильный конечный результат, с точки зрения математики, однако полученные степенные ряды функций напряжений не имеют физического смысла, в отличие от степенных рядов функций напряжений, полученных при расчете первым способом. Коэффициент погружения  $\alpha$  можно рассматривать как коэффициент

масштабирования нагрузки и генерации. При увеличении  $\alpha$  получается, что во всей схеме происходит пропорциональное утяжеление режима, при этом напряжение должно снижаться, что мы и наблюдаем на рис. 3, а. При этом значение параметра  $\alpha$ , при котором происходит резкое изменение и в дальнейшем резкий скачок графика аппроксимации Паде, можно рассматривать как предельное, соответствующее случаю нарушения устойчивости нагрузки в узле.

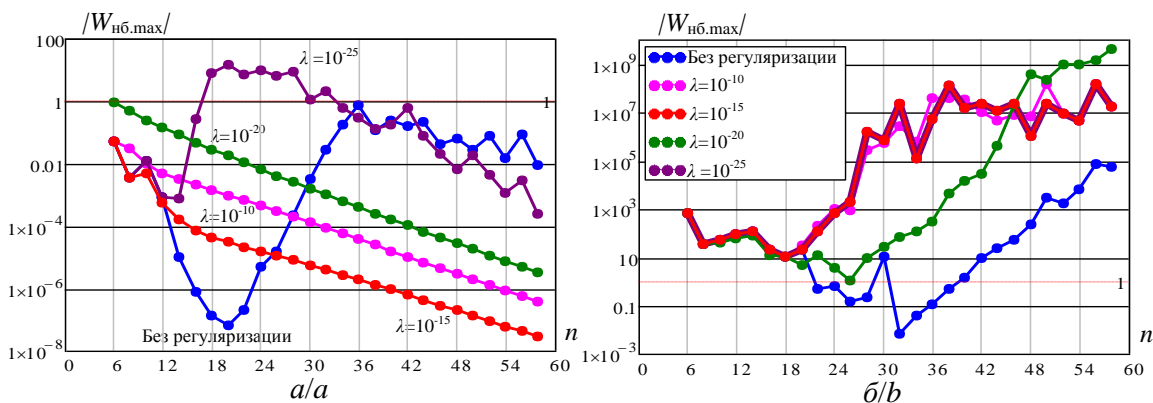


**Рис. 3.** График степенного ряда напряжения и соответствующая ему аппроксимация Паде для узла 19: а) без учета шунтов на землю трансформаторных ветвей в векторе шунтов  $Y_{шн}$ ; б) с учетом шунтов на землю трансформаторных ветвей в векторе шунтов  $Y_{шн}$

**Fig. 3.** Picture of power series of the voltage and the corresponding Padé approximation for node 19: а) without shunts to earth of transformer branches in the shunt  $Y_{шн}$ ; б) with shunts to earth of transformer branches in the shunt  $Y_{шн}$

Следует отметить также влияние количества коэффициентов степенных рядов на точность получаемого решения, оцененную по погрешности мощности в узлах. В первом случае минимальное значение максимального небаланса мощности в узлах составляет  $5,62 \cdot 10^{-8}$  при  $n=20$ , во втором –  $5,707 \cdot 10^{-3}$  при  $n=32$ . При этом поначалу с увеличением количества коэффициентов степенного ряда точность повышается, однако затем она начинает снижаться (рис. 4). Это связано с влиянием числовой точности на результаты вычисления аппроксимаций Паде, вычисление которых требует большой точности. Максимальное количество членов степенного ряда ограничивается точностью числа с плавающей запятой. Дальнейший расчет дополнитель-

ных членов может приводить к искажению результатов. Для получения более точного решения можно использовать числа повышенной точности или применить метод регуляризации решения. На рис. 4 приведены графики изменения наибольшего небаланса мощности в узлах от количества членов степенного ряда без регуляризации и с регуляризацией при различных параметрах регуляризации  $\lambda$ . Достаточное количество вычисляемых членов степенного ряда для обеспечения допустимой погрешности по мощности в узлах в общем случае зависит от схемы и режимной ситуации. Примерное количество членов ряда, при котором обеспечивается допустимая погрешность, 20–30. Оптимальное значение параметра регуляризации  $\lambda=10^{-15}$ .



**Рис 4.** График изменения наибольшего небаланса мощности в узлах от количества членов степенного ряда и параметра регуляризации: а) без учета шунтов на землю трансформаторных ветвей в векторе шунтов  $Y_{ш}$ ; б) с учетом шунтов на землю трансформаторных ветвей в векторе шунтов  $Y_{ш}$

**Fig. 4.** Picture of the largest power mismatch in nodes as a function of the number of power series members: a) without shunts to earth of transformer branches in the shunt  $Y_{ш}$ ; b) with shunts to earth of transformer branches in the shunt  $Y_{ш}$

**Оценка существования системы уравнений многоузловой схемы**

Среди проблем, возникающих при анализе режимов, особое место занимает проблема существования решения уравнений УР ЭЭС [2, 3]. Система уравнений УР может иметь множество решений или не иметь ни одного. Вопрос о существовании нормального режима сводится к определению условий, при которых существует решение этой системы, и к выбору из множества возможных решений того, которое соответствует физической сущности решаемой задачи.

В работе [10] было рассмотрено условие существования решения для двухузловой схемы

$$D = \frac{1}{4} + \sigma_R - \sigma_I^2 \geq 0, \text{ или } \sigma_R \leq \sigma_I^2 - \frac{1}{4}, \quad (29)$$

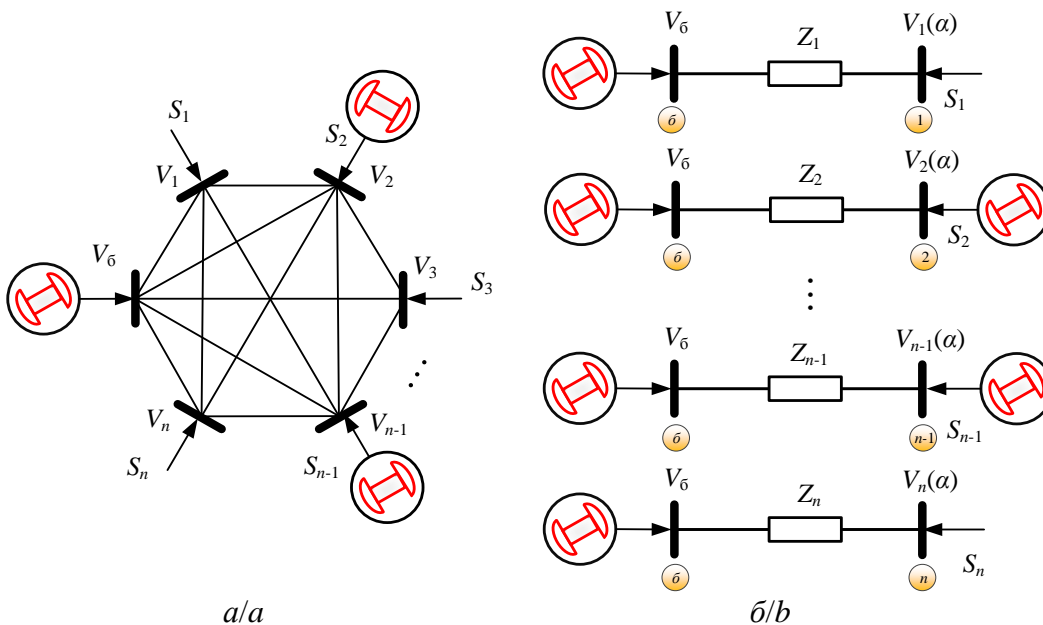
где  $\sigma_R = \text{Re } \sigma = \frac{XQ + RP}{|U_6|^2}$  и  $\sigma_I = \text{Im } \sigma = \frac{XP - RQ}{|U_6|^2}$  -

действительная и мнимая части коэффициента

$$\sigma = \frac{ZS^*}{|U_6|^2}.$$

Данное условие графически можно представить в виде параболы. Точки внутри параболы соответствуют физическому или устойчивому решению, а точки снаружи – нефизическому решению. Точки, находящиеся на параболе, соответствуют системе на границе устойчивости.

Условие (29) является строгим условием существования режима лишь для двухузловой схемы. Полученное условие можно использовать в качестве практического критерия оценки устойчивости системы уравнений и для многоузловой схемы [23]. Многоузловую схему, состоящую из  $n$  узлов, можно преобразовать относительно каждого узла системы к двухузловой схеме (рис. 5) [23–27].



**Рис 5.** Преобразование многоузловой схемы: а) обобщенная многоузловая схема; б) эквивалентные двухузловые схемы  
**Fig. 5.** Converting a multi-node power system: a) generalized multi-node power system; b) equivalent two-node system

При некоторых допущениях напряжение каждого узла системы можно представить в виде

$$V_i = V_6 + \frac{Z_i S_i^*}{V_i^*}. \quad (30)$$

Уравнение (30) можно привести к виду

$$U_i = 1 + \frac{\sigma_i}{U_i^*}, \quad (31)$$

где  $U_i = \frac{V_i}{V_6}$  и  $U_i^* = \frac{V_i^*}{V_6^*}$  – напряжения, приведенные к

базисному;  $\sigma_i = \frac{Z_i S_i^*}{|V_6|^2}$  – комплексный коэффициент,

характеризующий состояние узла в электрической сети, рассчитываются для каждого конкретного узла сети [23].

Коэффициенты  $\sigma_i$  ( $\sigma$ -индексы) могут быть вычислены на основе результатов расчета метода голоморфного погружения. Для этого  $\sigma$ -индексы можно

представить в виде функций от параметра погружения  $\alpha$ :

$$\sigma_i(\alpha) = \sum_{i=0}^n \sigma_i[n] \alpha^n = \sigma_i[0] + \sigma_i[1] \alpha + \dots + \sigma_i[n] \alpha^n.$$

Расположение  $\sigma_i$ -индексов относительно параболы  $\sigma_R \leq \sigma_i^2 - \frac{1}{4}$  позволяет оценить возможность существования системы уравнений многоузловой схемы. Изменение значения параметра погружения позволяет проследить перемещения каждого  $\sigma_i$ -индекса на графике до границы устойчивости, тем самым определить критическое значение коэффициента.

Получим выражение для расчета коэффициентов функции  $\sigma(\alpha)$ . Для этого осуществим голоморфное погружение параметра  $\alpha$  в уравнение (31) следующим образом:

$$U_i(\alpha) = 1 + \frac{\sigma_i(\alpha)}{U_i^*(\alpha^*)} = 1 + \sigma_i(\alpha) W_i^*(\alpha^*).$$

Заменяя функции комплексных переменных степенными рядами, получаем следующее выражение

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n U[n] \alpha^n &= 1 + \sum_{i=0}^n \sigma[n] \alpha^n \sum_{i=0}^n W^*[n] \alpha^n = \\ &= 1 + \sum_{k=0}^n \sigma[k] W^*[n-k] \alpha^n. \end{aligned} \quad (32)$$

Раскладывая суммы в (32) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях  $\alpha^n$  с левой и правой частей равенства, получаем:

$$\begin{aligned} U[0] &= 1 + \sigma[0] W^*[0] \\ U[1] &= \sigma[0] W^*[1] + \sigma[1] W^*[0] \\ &\vdots \\ U[n] &= \sum_{k=0}^n \sigma[k] W^*[n-k] = \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \sigma[k] W^*[n-k] + \sigma[n] W^*[0]. \end{aligned} \quad (33)$$

Из уравнений (33) можно составить общую формулу для вычисления  $n$ -го коэффициента ряда функции  $\sigma(\alpha)$ :

$$\sigma[n] = \begin{cases} \frac{U[0]-1}{W^*[0]}, & n=0; \\ \frac{U[n] - \sum_{k=0}^{n-1} \sigma[k] W^*[n-k]}{W^*[0]}, & n \geq 1. \end{cases}$$

Для вычисления значения параметра  $\sigma$  рассчитываем аппроксимацию Паде  $\sigma = [L/M]_{\alpha \omega} |_{\alpha=1}$ .

Также на графике можно визуальным образом показать, в каких пределах располагаются модули напряжений в узлах. Из выражения (31) следует, что все точки одного и того же модуля напряжения  $U'$ , приведенного к напряжению базисного узла, описывают окружность радиуса  $U'$ , смещенную по действительной оси на  $U'^2$  и касающуюся граничной параболы:

$$\sigma = -U'e^{-i\delta} + U'^2 \quad \text{или} \quad (\sigma_R - U'^2)^2 + \sigma_i^2 = U'^2.$$

Для визуального выявления узлов, напряжение в которых отклоняется от допустимых эксплуатационных значений, на графике можно отобразить окружности, соответствующие допустимым отклонениям. Точки внутри окружности соответствуют узлам с напряжением выше напряжения, для которого построена окружность.

Для рассматриваемой тестовой схемы рассмотрим два случая: нормальный и предельный режим. Выполним расчет для рассматриваемого режима (рис. 3). Из графика на рис. 6, а видно, что точки, характеризующие каждый узел, располагаются в пределах параболы. Это говорит о том, что система уравнений совместна и устойчивое решение существует.

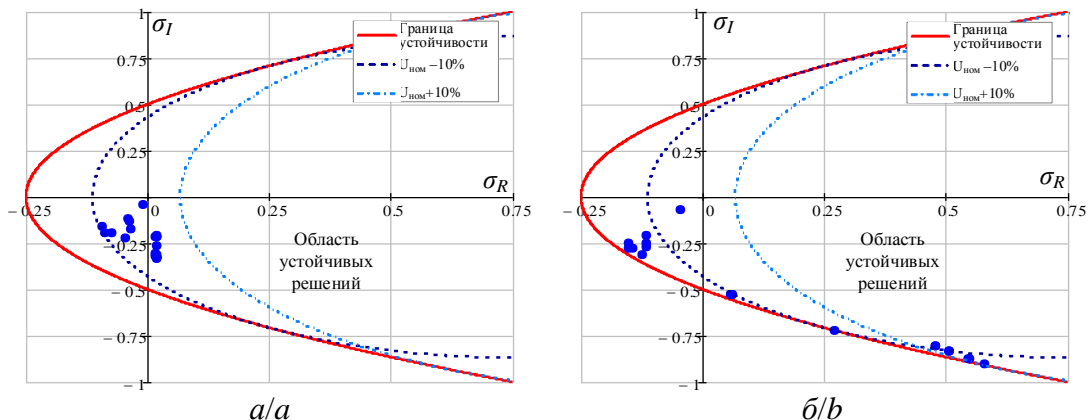


Рис 6. График визуальной оценки возможности существования режима: а) нормальный режим,  $S_{n14}=2+j1 \text{ MB}\cdot\text{A}$ ; б) предельный режим,  $S_{n14}=36+j12 \text{ MB}\cdot\text{A}$

Fig. 6. Picture of visual estimation of existence of a steady-state solution: a) normal operation,  $S_{n14}=2+j1 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ; b) limit load operation,  $S_{n14}=36+j12 \text{ MV}\cdot\text{A}$



Предельный режим получаем путем увеличения нагрузки в узле 14, при этом максимальное значение мощности, при которой режим считается методом Ньютона–Рафсона со стартовым алгоритмом,  $S_{n14}=36+j12$  МВ·А. Из рис. 6, б видно, что для данного предельного режима точки сдвинулась ближе к параболе, часть точек практически лежит на параболе, что говорит о том, что режим действительно предельный. Следует заметить, что, говоря о многоузловой схеме, нельзя однозначно сказать, что нарушается устойчивость, если хотя бы одна из точек лежит вне параболы. Совокупность двухузловых математических моделей электрической сети неполно описывает действительное состояние реальной многоузловой модели: не учтены статические характеристики нагрузки, действие регуляторов напряжения, изменение положений автоматически регулируемых переключателей ответвлений трансформаторов и т. д. Поэтому, как показали расчеты, в реальной сети режим может существовать в то время, когда условие (29) не выполняется и одна или несколько точек выходят за пределы параболы. Более полный анализ статической устойчивости необходимо выполнять по якобиану, сов-

падающему со свободным членом характеристического уравнения при соблюдении определенных условий [3]. Рассмотренный графический способ позволяет произвести примерную оценку возможности существования режима, а также ориентировочно выявить слабые узлы, т. е. узлы, которые наиболее близко расположены к параболе и изменение нагрузки и генерации в которых может привести к нарушению устойчивости.

В качестве дополнительного способа оценки существования системы уравнений можно применить анализ расположения нулей и полюсов разложения Паде на комплексной плоскости [28]. Из рис. 7 видно, что критерием приближения решения к границе устойчивости является приближение корней, расположенных вдоль действительной оси, к окружности радиуса  $R=1$  справа. При этом самый левый корень по действительной оси при  $\alpha > 0$  определяет точку ветвления, которая характеризует предельное значение коэффициента  $\alpha$ , на которое пропорционально можно увеличить нагрузку и генерацию, чтобы решение существовало.

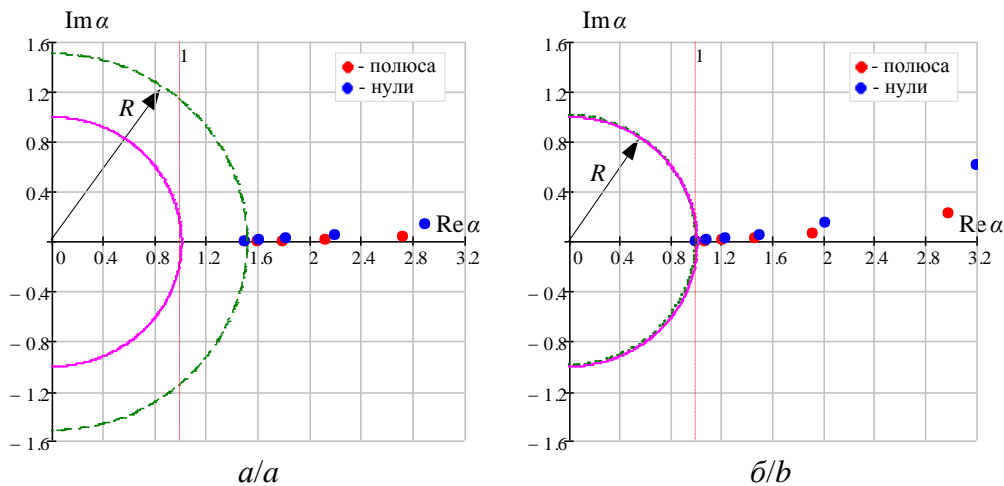


Рис 7. Расположение полюсов и нулей полиномов аппроксимации Паде функции  $U_{19}(a)$ : а) нормальный режим,  $S_{n14}=2+j1$  МВ·А; б) предельный режим,  $S_{n14}=36+j12$  МВ·А

Fig. 7. Location of poles and zeros of the Padé approximants polynomials of the function  $U_{19}(a)$ : а) normal operation,  $S_{n14}=2+j1$  MV·A; б) limit load operation,  $S_{n14}=36+j12$  MV·A

Значения нулей и полюсов аппроксиманта Паде зависят от вычисленных коэффициентов полиномов числителя и знаменателя аппроксимации Паде. При определенном количестве членов исходного степенного ряда можно получить значения нулей и полюсов, по расположению которых невозможно оценить существование режима из-за их хаотичного расположения на плоскости (рис. 8, а). Применяя регуляризацию при вычислении коэффициентов полинома знаменателя аппроксимации Паде, согласно формуле (28), можно улучшить решение. При этом значения нулей и полюсов будут зависеть от выбранного параметра регуляризации  $\lambda$  (рис. 8, б–г). Необходимо подобрать параметр регуляризации  $\lambda$  так, чтобы корни расположились по действительной. Оптимальное зна-

чение параметра регуляризации  $\lambda=10^{-15}$ , при  $\lambda=10^{-25}$  корни отдаляются от действительной оси.

Точка ветвления без расчета полюсов и нулей аппроксимации Паде может быть приближенно определена по критерию Фабри [28]

$$R_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|c_n|}{|c_{n+1}|},$$

где  $c_0, c_1, \dots, c_n$  – коэффициенты функции напряжения  $i$ -го узла  $U_i(\alpha)=c_0+c_1\alpha+\dots+c_n\alpha^n$ .

Точки ветвления рассчитываются для каждого узла схемы, при этом в качестве предельного значения выбирается самое минимальное значение  $R_i$ .

Стоит отметить, что величину  $\max(1/R_i)$  можно рассматривать как коэффициент напряженности ре-

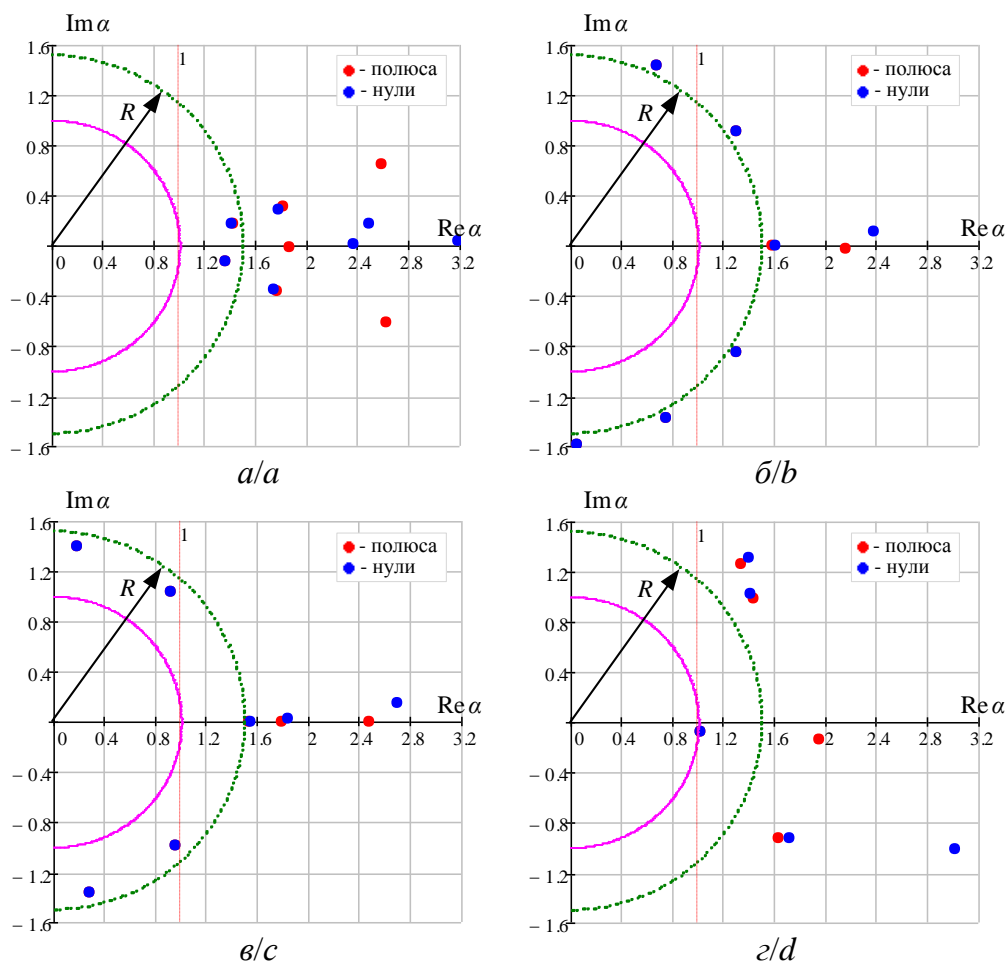
жима  $k_n$ , т. е. показатель запаса статической устойчивости энергосистемы, численно характеризующий напряженность режима. При  $k_n < 1$  режим существует, при  $k_n = 1$  – режим предельный, при  $k_n > 1$  – режим не существует. В таблице представлены результаты расчета для рассматриваемой схемы.

### Заключение

В работе представлен аналитический метод расчета установившихся режимов – метод голоморфного погружения. Рассмотренный метод существенно повышает эффективность решения задачи расчета установившихся режимов распределительных сетей

нефтегазовых месторождений. Преимуществом метода является то, что для него не нужно задавать начальное приближение, как в классических итерационных методах.

На примере тестовой схемы показано, что погрешность меньше в случае, если неизвестные параметры описываются сходящимися рядами. За счет использования аппроксимации Паде можно получить корректный результат с меньшей погрешностью. Аппроксимация Паде обеспечивает хорошее приближение вне радиуса сходимости выражения степенного ряда, а также ускоряет сходимость.



**Рис. 8.** Расположение полюсов и нулей полиномов аппроксимации Паде функции  $U_{19}(a)$  в нормальном режиме при  $n=32$ : а) без регуляризации; б) с регуляризацией,  $\lambda = 10^{-10}$ ; в) с регуляризацией,  $\lambda = 10^{-15}$ ; г) с регуляризацией,  $\lambda = 10^{-25}$

**Fig. 8.** Location of poles and zeros of the Padé approximants polynomials of the function  $U_{19}(a)$ : а) without regularization; б) with regularization,  $\lambda = 10^{-10}$ ; в) with regularization,  $\lambda = 10^{-15}$ ; г) with regularization,  $\lambda = 10^{-25}$

**Таблица.** Оценивание существования режимов по полюсам и нулям полиномов аппроксимаций Паде  
**Table.** Estimation of power system stability using poles and zeros of Padé approximants polynomials

Режим/State	Мин. полюс/Min. pole	Мин. ноль/Min. zero	min( $R_i$ )	max( $1/R_i$ )
Нормальный режим, $S_{n14}=2+j1 \text{ MV}\cdot\text{A}$ Normal operation, $S_{n14}=2+j1 \text{ MV}\cdot\text{A}$	$1,5086 - j9,981716 \cdot 10^{-4}$	$1,512911 + j2,587827 \cdot 10^{-4}$	1,509797	0,662341
Предельный режим, $S_{n14}=36+j12 \text{ MV}\cdot\text{A}$ Limit load operation, $S_{n14}=36+j12 \text{ MV}\cdot\text{A}$	$1,005364 - j3,261143 \cdot 10^{-3}$	$1,00707 + j1,985935 \cdot 10^{-3}$	1,003287	0,996724

Нефизическое решение, $S_{n14}=37+j13 \text{ MB}\cdot\text{A}$ Non-physical solutions, $S_{n14}=37+j13 \text{ MV}\cdot\text{A}$	$0,98805 - j3,242884 \cdot 10^{-3}$	$0,989631 + j1,953492 \cdot 10^{-3}$	0,985943	1,014257
--	-------------------------------------	--------------------------------------	----------	----------

Метод открывает новые возможности анализа состояний энергосистем, решения проблемы существования, множественности решения и анализа устойчивости за счет использования концепций применения алгебраических кривых и комплексного анализа.

Предложенные уравнения голоморфного погружения не учитывают статических характеристик нагрузки. В дальнейшем планируется расширить модель с учетом статических характеристик нагрузки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах / Б.И. Аюев, В.В. Давыдов, П.М. Ерохин, В.Г. Неуймин. – М.: Изд-во «Флинта», 2008. – 256 с.
2. Тарасов В.И. Теоретические основы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, 2002. – 344 с.
3. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.
4. Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 173–180.
5. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
6. Новые технологии и современное оборудование в энергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентра», 2007. – 478 с.
7. Тарасов В.И. Методы минимизации ньютоновского типа для расчета установившихся режимов электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, 2001. – 168 с.
8. Trias A. The holomorphic embedding load flow method // Power and Energy Society General Meeting. – San Diego, July 2012. – P. 1–8.
9. Trias A. Fundamentals of the holomorphic embedding load-flow method. URL: <https://arxiv.org/abs/1509.02421> (дата обращения: 01.09.2020).
10. Исаев Ю.Н., Кабалин Д.А. Голоморфное погружение как аналитический метод расчета электрических сетей нефтяных и газовых месторождений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 115–125.
11. Шабат Б.В. Введение в комплексный анализ. Ч. 1: Функции одного переменного. – М.: Наука, 2004. – 336 с.
12. Subramanian M.K., Feng Y., Tylavsky D. PV bus modeling in a holomorphically embedded power-flow formulation // 2013 North American Power Symposium (NAPS). – Manhattan, 2013. – P. 1–6.
13. The holomorphic embedding method applied to the power-flow problem / S. Rao, Y. Feng, D.J. Tylavsky, M.K. Subramanian // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. – V. 31. – № 5. – P. 3816–3828.
14. Ali Reza Abbasi. Probabilistic load flow based on holomorphic embedding, kernel density estimator and saddle point

- approximation including correlated uncertainty variables // Electric Power Systems Research. – 2020. – V. 183. – P. 106178.
15. Santos A.C., Freitas F.D., Fernandes L.F.J. Holomorphic embedding approach as an alternative method for solving the power flow problem // 2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). – Brasilia, 2017. – P. 1–4.
  16. Remote voltage control using the holomorphic embedding load flow method / C. Liu, N. Qin, K. Sun, C.L. Bak // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2019. – V. 10. – № 6. – P. 6308–6319.
  17. Бейкер Дж. мл., Грейвс-Моррис П. Аппроксимация Паде. – М.: Мир, 1986. – 502 с.
  18. Суетин С.П. Аппроксимации Паде и эффективное аналитическое продолжение степенного ряда // УМН. – 2002. – Т. 57. – Вып. 1 (343). – С. 45–142.
  19. Никишин Е.М., Сорокин В.Н. Рациональные аппроксимации и ортогональность. – М.: Наука, 1988. – 258 с.
  20. Stahl H. Orthogonal polynomials with complex-valued function. I, II // Constr. Approx. – 1986. – V. 2. – P. 225–251.
  21. Stahl H. Domains associated with an analytic function. I // Complex Variables Theory Appl. – 1985. – V. 4 (4). – P. 311–324.
  22. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректно поставленных задач. – М.: Наука, 1986. – 286 с.
  23. Sigma algebraic approximants as a diagnostic tool in power networks: US Patent, № 9563722 B2, 2017.
  24. Rao S.D., Tylavsky D.J., Feng Y. Estimating the saddle-node bifurcation point of static power systems using the holomorphic embedding method // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – V. 84. – P. 1–12.
  25. Rao S., Tylavsky D., et al. Two-bus holomorphic embedding method based equivalents and weak-bus determination. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1706.01298> (дата обращения: 01.09.2020).
  26. Lai Q., Liu C., Sun K. A network decoupling method for voltage stability analysis based on holomorphic embedding. URL: <https://arxiv.org/abs/2003.12287> (дата обращения: 01.09.2020).
  27. Online voltage stability assessment for load areas based on the holomorphic embedding method / Chengxi Liu, Bin Wang, Fengkai Hu, Kai Sun, Claus Leth Bak // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – V. 33. – № 4. – P. 3720–3734.
  28. Suetin S.P., Bagnosorkhi S.S. Embedding AC power flow in the complex plane. Part I: Modelling and mathematical foundation. – 2016. – 13 p. URL: <https://arxiv.org/abs/1604.03425> (дата обращения: 01.09.2020).

Поступила 05.02.2021 г.

#### Информация об авторах

**Исаев Ю.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кабалин Д.А.**, аспирант отделения электроэнергетики, 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.

UDC 621.314.58:681.5.015

## HOLOMORPHIC EMBEDDING AS ANALYTICAL TECHNIQUE FOR CALCULATING ELECTRIC GRIDS OF OIL AND GAS DEPOSITS AND ASSESSING THEIR STABILITY

Yusup N. Isaev<sup>1</sup>,  
isaev\_yusup@mail.ru

Dmitry A. Kabalin<sup>1</sup>,  
mitya.kabalin@gmail.com

Alexander A. Filipas<sup>1</sup>,  
filipas@tpu.ru

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

To effectively solve the problems of operational dispatch control of the operating modes of the unified power system, its individual power systems and power districts, in particular, oil production power districts, it is required to carry out calculations of the established modes of electrical networks. In addition, along with the calculations of steady-state regimes, it is important to study the stability of the power grid operation. The convergence and rate of convergence of widely used iterative methods for calculating steady-state modes depend on many operating and design factors determined by the network and mode parameters, the choice of initial approximations, and the method for specifying the initial data. Therefore, the development of new methods that make it possible to calculate all steady-state regimes are of significant practical interest. One of the promising techniques is the holomorphic imbedding method. In this method, the unknown parameters of the nodes are represented in the form of holomorphic functions, which can be written in the form of power series, the coefficients of which are calculated using recurrent expressions, and the problem is reduced to finding the coefficients of the power series. In a previously published article by the authors, the method is considered for a circuit with load nodes. For a complete correct analysis of the modes of real power systems, it is necessary to show how to calculate for generating units. The paper presents recurrent expressions for calculating the unknown coefficients of the holomorphic functions of the unknown parameters of the system of steady-state equations for the load and generator nodes. The expressions obtained, in contrast to those proposed in the works of other authors, are more general. The principle of forming a matrix equation for finding unknown coefficients with the division of complex parameters into real and imaginary parts is shown. A method for obtaining converging power-law in some cases is proposed. On the example of a test power system, the advantage over the Newton–Raphson method is shown. We consider the question of evaluating the existence of a solution to the system of equations of the steady state for a multinode network based on a sigma-graph. An approach is proposed to determine the indicator of the static stability margin of the power system, based on the Fabry criterion.

**The aim** of the research is to apply the analytical method of holomorphic imbedding to calculate an electrical circuit containing load and generator units; to evaluate the influence of the number of calculated power series coefficients on the accuracy of the obtained solution, and also to consider ways to increase the numerical accuracy of the solution, consider the question of evaluating the existence of a solution to the system of equations of the steady state for a multi-node network based on the analysis of power series.

**Methods:** Taylor expansion, analytic continuation, Padé approximation, solving algebraic equations by the recursive method.

**Results.** Using the example of a scheme with a poorly conditioned Jacobi matrix, in which the Newton–Raphson method does not converge from a flat start, the advantage of the holomorphic immersion method is shown. The influence of the number of members of the power series on the calculation error is shown. For the considered scheme, a graphical estimate of the existence of a solution to the system of equations is performed.

**Conclusions.** For load and generator nodes, the unknown parameters can be represented as holomorphic functions, which can be written down as a Taylor series, the coefficients of which are calculated using recurrent expressions. Partial consideration of shunts to the ground in the diagonal elements of the matrix of successive conductances makes it possible to obtain converging power series in some cases. The considered graphical method for assessing the possibility of the regime existence allows us to make a rough estimate. Unlike classical iterative methods, an initial approximation is not specified for the holomorphic immersion method.

### Key words:

Power system, steady-state process, stability, nonlinear equations, holomorphic immersion, Padé expansion, convergence.

### REFERENCES

1. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M., Neuiymin V.G. *Vychislitelnye modeli potokoraspredeleniya v elektricheskikh sistemakh* [Power flow computing models in power systems]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 256 p.
2. Tarasov V.I. *Teoreticheskie osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Theoretical bases of analysis of steady-state modes of electric power systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2002. 344 p.
3. Idelchik V.I. *Raschety ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh sistem* [Calculations of steady-state modes of electric systems]. Moscow, Energia Publ., 1977. 192 p.
4. Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Methodology of modeling regionally isolated electrotechnical complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 173–180. In Rus.
5. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. *Raschety ustoychivosti i protivoavariynoy avtomatiki v energosistemakh* [Calculation of stability and emergency automation in power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p.
6. Belousenko I.V., Schwartz G.R., Great S.N., Ershov M.S. Yarizov A.D. *Novye tekhnologii i sovremennoe oborudovanie v energetike neftegazovoy promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in the energy sector of the oil and gas industry]. Moscow, Nedra-Biznestsentra Publ., 2007. 478 p.
7. Tarasov V.I. *Metody minimizatsii nyutonovskogo tipa dlya rascheta ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Newton type minimization methods for calculation steady states of electric power systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001. 168 p.

8. Trias A. The holomorphic embedding load flow method. *Power and Energy Society General Meeting*. San Diego, July 2012. pp. 1–8.
9. Shabat B.V. *Vvedenie v kompleksny analiz. Ch. 1: Funktsii odnogo peremennogo* [Introduction to complex analysis. P. 1: Functions of one variable]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 336 p.
10. Trias A. *Fundamentals of the holomorphic embedding load-flow method*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1509.02421> (accessed 1 September 2020).
11. Isaev Yu.N., Kabalin D.A. Holomorphic embedding as analytical technique for calculating electric grids of oil and gas deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 115–125. In Rus.
12. Subramanian M.K., Feng Y., Tylavsky D. PV bus modeling in a holomorphically embedded power-flow formulation. *2013 North American Power Symposium (NAPS)*. Manhattan, 2013. pp. 1–6.
13. Rao S., Feng Y., Tylavsky D.J., Subramanian M.K. The holomorphic embedding method applied to the power-flow problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31, no. 5, pp. 3816–3828.
14. Ali Reza Abbasi. Probabilistic load flow based on holomorphic embedding, kernel density estimator and saddle point approximation including correlated uncertainty variables. *Electric Power Systems Research*, 2020, vol. 183, pp. 106178.
15. Santos A.C., Freitas F.D., Fernandes L.F.J. Holomorphic embedding approach as an alternative method for solving the power flow problem. *2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. Brasilia, 2017. pp. 1–4.
16. Liu C., Qin N., Sun K., Bak C.L. Remote voltage control using the holomorphic embedding load flow method. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, vol. 10, no. 6, pp. 6308–6319.
17. Baker G.A., Graves-Morris P. *Approksimatsia Pade* [Padé approximants]. Moscow, Mir Publ., 1986. 502 p.
18. Suetin S.P. Padé approximants and the effective analytic continuation of a power series. *Russian Math. Surveys*, 2002, vol. 57, no. 1, pp. 45–142.
19. Nikishin E.M., Sorokin V.N. *Ratsionalnye approksimatsii i ortogonalnost* [Rational approximations and orthogonality]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 258 p.
20. Stahl H. Orthogonal polynomials with complex-valued function. I, II. *Constr. Approx.*, 1986, vol. 2, pp. 225–251.
21. Stahl H. Domains associated with an analytic function. I. *Complex Variables Theory Appl.*, 1985, vol. 4 (4), pp. 311–324.
22. Tihonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektno postavlennykh zadach* [Methods of solution of ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 286 p.
23. Trias A. *Sigma algebraic approximants as a diagnostic tool in power networks*. US Patent, no. 9563722 B2, 2017.
24. Rao S.D., Tylavsky D.J., Feng Y. Estimating the saddle-node bifurcation point of static power systems using the holomorphic embedding method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 84, pp. 1–12.
25. Rao S., Tylavsky D. *Two-bus holomorphic embedding method based equivalents and weak-bus determination*. 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1706.01298> (accessed 1 September 2020).
26. Lai Q., Liu C., Sun K. *A network decoupling method for voltage stability analysis based on holomorphic embedding*. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2003.12287> (accessed 1 September 2020).
27. Chengxi Liu, Bin Wang, Fengkai Hu, Kai Sun, Claus Leth Bak. Online voltage stability assessment for load areas based on the holomorphic embedding method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 3720–3734.
28. Suetin S.P., Baghsorkhi S.S. *Embedding AC power flow in the complex plane*. P. I: Modelling and mathematical foundation. 2016. 13 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/1604.03425> (accessed 1 September 2020).

*Received: 5 February 2021.*

#### Information about the authors

**Yusup N. Isaev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry A. Kabalin**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander A. Filipas**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 629.5:62.2.622.276.53.054.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СИЛОВОГО ПРИВОДА НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА НА МАЛОДЕБИТНЫХ СКВАЖИНАХ ПРИ ВНЕДРЕНИИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОГИДРОЦИЛИНДРА РЕКУПЕРАТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Савинкин Виталий Владимирович<sup>1</sup>,  
cavinkin7@mail.ru

Визуриане Петрика<sup>2</sup>,  
peviz2002@yahoo.com

Санду Андрей Виктор<sup>2</sup>,  
sav@tuiasi.ro

Колисниченко Светлана Викторовна<sup>1</sup>,  
svetlana\_ko-ko@mail.ru

Ратушная Татьяна Юрьевна<sup>1</sup>,  
tratushnaia@mail.ru

Омаров Малик Шамильевич<sup>3</sup>,  
omarov\_malik@mail.ru

<sup>1</sup> Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,  
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86.

<sup>2</sup> Технический университет имени Георге Асачи,  
Румыния, 700050, г. Яссы, Бульвар доктора Мангерона, 41.

<sup>3</sup> ТОО «Завод многопрофильного оборудования»,  
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Я. Гашека, 22.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки научно-обоснованной конструктивно-технологической системы эффективного перераспределения мощности по исполнительным элементам высоконагруженно-го оборудования в соответствии с энергоемкостью процесса добычи углеводородного сырья. Актуальность подтверждена дефицитом отечественных технологий по разработке гибридных приводов рекуперативного действия, используемых для производства и преобразования энергии, основанных на исследовании синергетических связей насосных комплексов малодебитных скважин как основного показателя энергоэффективности.

**Цель:** повышение энергоэффективности и ресурсной долговечности высоконагруженных нефтедобывающих насосных комплексов малодебитных скважин за счет внедрения разработанного гибридного привода с электрогидроцилиндром рекуперативного действия, обеспечивающего перераспределение мощности по исполнительным элементам.

**Объект:** гибридная система привода добывающего станка-качалки с энергоэффективным электроцилиндром рекуперативного действия.

Применялся комплексный метод исследования взаимодействия двух физически и технически разнородных сред (гидравлика и электромагнитные поля) в структуре нагруженных деталей гибридного привода. Методами кинематического анализа и силового расчета исследован циклический процесс динамического нагружения рабочего оборудования насосного комплекса. Использовалась методология системного анализа, а также метод перераспределения моментов сил инерции и мощностного баланса силового привода. Эффективно применен математический аппарат для установления зависимостей изменения мощностных характеристик от эксплуатационных показателей и динамических нагрузок насосного комплекса. Методом критического анализа установлены приоритеты развития геометрических параметров, а использование законов механики позволило обосновать структурные элементы кинематики, требующие усовершенствования. Инструментарий метода конечных элементов и расчетных систем позволил исследовать работоспособность гибридного привода, провести анализ и обработку полученных результатов.

**Результаты.** Разработана конструкция гибридного электрогидроцилиндра рекуперативного действия, обеспечивающая эффективное преобразование механической и гидравлической энергии гидропривода в электрическую при воздействии силы тяжести масс рабочего оборудования нефтедобывающего насосного комплекса для малодебитных скважин. Разработанная конструкция существенно повышает энергоэффективность силовой установки и привода нефтедобывающего комплекса, обеспечивая перераспределение мощности гибридного привода в соответствии с энергоемкостью операций. Решена научная проблема эффективного способа перераспределения мощности по элементам нефтедобывающих комплексов в соответствии с энергоемкостью выполняемой операции и преобразования энергии собственных масс тяжести рабочего оборудования. Разработана и обоснована новая научная идея реализации принципов рекуперации энергии и оптимального перераспределения мощности при выполнении наиболее энергоемких рабочих процессов наземного добывающего насосного комплекса, что обогатило научную концепцию повышения энергоэффективности добывающих комплексов и расширило границы применимости полученных результатов в гибридных приводах.

### Ключевые слова:

Нефтедобывающий комплекс, электрогидроцилиндр, рекуперация, энергоемкость, система перераспределения мощности.

### Введение

Современные технологии, применяемые в машиностроительной, добывающей и энергетической отраслях, ориентированы, в первую очередь, на повышение долговечности, безотказности и производи-

тельности добывающих комплексов. Указанные показатели достигнуты за счет развития теории и практики новых технологий модификации поверхностей, совершенствования конструкций, обоснования новых сочетаний оптимальных многокомпонентных наноматериалов.

териалов и т. д. В настоящее время происходит революционное переосмысление значимости таких показателей, как энергоёмкость, энергоэффективность и ресурсосбережение [1]. Эти качественно новые направления стали не просто отражать достижения науки, но создали симбиоз технологий на стыке гуманитарных и технических наук. Практический результат отражен в автоматизации сложных технологических процессов, применении искусственного интеллекта для мониторинга насосных комплексов нефтепроводов на удаленном доступе и принятия решений в нестандартных ситуациях на малодебитных скважинах. Так, например, если до 2000-х гг. добыча и транспортировка георесурсов была сведена к повышению производительности, ресурса добывающих комплексов и увеличению силового воздействия, то сегодня необходимо ставить задачи иной направленности [1, 2]. На сегодняшний день к нерешенным научно-техническим проблемам энергоэффективности следует отнести перераспределение мощности по элементам нефтедобывающих комплексов в соответствии с энергоёмкостью выполняемой операции и преобразованием энергии собственных масс оборудования. Решить данную задачу можно при компенсации существующих пробелов знаний в управлении точным позиционированием подвижных элементов, исследовании зависимостей эффективности гибридации приводов и развитии физических принципов рекуперации энергии. Добывающие машины, как правило, носят циклический или непрерывный характер действия и возобновляемый их рециклинг эффективен при рекуперативных возможностях систем управления и контроля.

#### **Анализ технических проблем в повышении эффективности штанговой насосной установки добывающего комплекса**

Комплексы по добыче и транспортировке георесурсов обладают высоким показателем долговечности. Преобразование энергии и обеспечение комплексов высокими функциональными возможностями достигнуто оснащением машин силовыми гидроцилиндрами. Несмотря на высокий силовой потенциал, данный вид привода не соответствует современным потребностям энергоэффективных технологий преобразования, перераспределения и управления энергией [2, 3].

В связи с широким диапазоном применения станков-качалок в нефтедобывающей промышленности исследователи сконцентрировали научный интерес на повышении энергоэффективности балансирного привода штанговой насосной установки. Многообразие технических решений отражено во многих охраняемых документах. Большая часть технических достижений исследователей направлена на усложнение конструкции и решает только частные задачи – изменение производительности путем кратного изменения хода колонны штанг. Например, в изобретениях А.С. Латыпова, Б.А. Мырзахметова для этих целей предусмотрены мачта, имеющая степень свободы для отклонения от устья скважины, дополнительный канатный блок, патрубки с системой тяг, дополнительный

противовес, подвешенный свободно, и т. д. [4]. В трудах А.В. Молчанова, В. Лесниченко, А. Безубова, И. Горького наклон опоры реализуется тяговыми и силовыми гидроцилиндрами, применяется поддомкрачивание мачты. Во всех перечисленных конструкциях при регулировании производительности станка-качалки возникают проблемы в процессе их эксплуатации. Подобная структура привода неэффективна: канат талевой оснастки по всей рабочей длине испытывает максимальную нагрузку, что снижает срок службы привода; допустимый ход регулятора угла отклонения мачты ограничен стыковочными концами тяг; мачта с удлиненным элементом создает проблемы при ее транспортировке; замена рабочих канатов очень трудоемка. В конструкциях данного типа кратное увеличение длины хода плунжера насоса возможно только при распасовке талевой оснастки, или приходится мангазировать канаты на пропускном барабане. Стандартные методы увеличения длины хода плунжера насоса нецелесообразны, так как неизбежно приводят к увеличению габаритов и массы привода комплекса и как следствие повышают крутящий момент на валу рабочего редуктора. Также к недостаткам конструкции можно отнести необходимость в изменении стандартных элементов станка-качалки, что усложняет технологию их изготовления и снижает уровень взаимозаменяемости. Например, станок-качалка модельного ряда АРЖ-3648 (США) при длине хода 7,6 м имеет увеличение массы до 25,3 т. При данных характеристиках у станка-качалки с грузоподъемностью 248 кН момент на валу редуктора составляет 402 кНм [4].

Периодический режим эксплуатации станков-качалок на малодебитных скважинах вызывает действие максимальных значений моментов сил сопротивления в определенный интервал времени в период пуска. Этот короткий временной интервал является максимально аварийно опасным для сопряженных деталей станка-качалки. В данных условиях снижается ресурс штанговых насосов, как результат прогрессивного образования в них асфальтосмолистых парафинистых структур. Наличие смолистых структур в колонне препятствует прямолинейному ходу штока. При ходе штока вниз под действием сил вязкого трения, направленных против движения штанг, нагрузка на штанговую колонну может снижаться практически до нулевого значения (эффект «зависания штанг»). Рассогласование движения головки балансира и штанговой колонны обуславливает возникновение ударов и обрывов штанг. Указанные факторы эксплуатации приводят к резкому возрастанию циклических нагрузок на все элементы установки. Циклические ударные нагрузки приводят к большей асимметричности их распределения по всем элементам насосной установки.

Указанные факторы и агрессивная среда нефтяного флюида повышает интенсивность изнашивания сопряженных элементов. Возрастающий износ цилиндра штангового насоса увеличивает зазор в сопряжениях, что приводит к изменению прямолинейного движения штока, а в период приложения максималь-

ных сил и моментов формирует ударную силу. Значение приложенных моментов сил изменяется в зависимости от длины хода штока и, как следствие, приводит к локальному формированию растягивающих и сжимающих напряжений в сопряжениях скважинных штанговых насосов. По результатам анализа актов дефектации и ремонта скважинных штанговых насосов установлено, что максимальные значения износа наблюдаются в условно разделенных нижней части цилиндра и в пограничной (между средним поясом и верхней частью). Износ в нижней части цилиндра соответствует пройденному пути штока в момент его ускорения при подъеме жидкости и движении по направлению вверх. Износ между средним поясом и верхней частью цилиндра соответствует положению штока в период торможения в конце хода вверх и ускорения в начале хода вниз, т. е. в моменты времени, соответствующие закрытию всасывающего и открытию нагнетательного клапана штангового насоса.

Анализ характера изнашивания и мест его локализации позволил сделать вывод о том, что данные периоды эксплуатации «разгон–ускорение» и «торможение–замедление штока» происходят в короткий интервал времени при действии максимальных моментов сил изгиба и инерции. На этапе аналитических исследований сделано теоретическое предположение о том, что совокупность действия максимальных моментов ( $M_{\max}$ ) сил на контактный участок площади нижней и верхней частей среднего пояса цилиндра приходится на момент ускорения и торможения штока. Ранее проведенные металлографические исследования [5] показали, что места образования микротрещин совпадают с зоной максимального изнашивания цилиндра.

Е.А. Демин, А.А. Дубов, В. Зханг, С. Конг [6] доказали, что образование микротрещин – следствие разрушения структурных связей в кристаллической решетке материала под действием сжимающих  $\sigma_u$  или растягивающих напряжений  $\sigma_r$ . При исследовании данных участков на концентрацию внутренних напряжений интегрированной методикой [7], принцип которой основан на использовании магнитоупругого эффекта и рассеяния магнитного потока в слабых магнитных полях, было установлено, что область локализации максимальной напряженности  $H_x$  (А/м) в металле соответствует участкам формирования износа цилиндра и образования трещин. Описанные особенности эксплуатации станков-качалок и моменты действующих сил формируют зоны концентрации внутренних напряжений не только в верхних слоях, но и в структуре материала. Значит, повысить эффективность работы скважного штангового насоса возможно не только упрочнением контактной поверхности материала, но и эффективным перераспределением действующих сил на контактную поверхность. Снизить напряженное состояние по всей длине рабочей поверхности сопряжений возможно при условии, что известен интервал времени, в котором действуют максимальные моменты сил и их интенсивность формирования. При исследовании процесса образования напряжений в сопряжениях штанговой насосной

установки цикличность воздействия максимальных моментов сил прием равной диапозону циклов качания большинства станков-качалок за сутки. Такой короткий интервал времени поможет более точно исследовать факторы, влияющие на процесс усталостного изнашивания при заданных условиях эксплуатации. Интенсивность формирования амплитудных напряжений  $\sigma_a$  в штанговых глубинных насосах (ШГН), приводящих к усталостному износу, составляет от 7000 до 19000 циклов в сутки. Однако при эксплуатации новых штанговых насосных установок в соответствии с требованиями ГОСТ 31825-2012 «Штанги насосные, штоки устьевые и муфты к ним. Технические условия» наблюдается обрыв головки штанги. Расчет приведенного напряжения  $\sigma_{пр}$  в штанге (1), характеризующего цикл нагружения в верхней штанге каждой ступени колонны, показал, что данное равенство справедливо только для новых насосов.

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a}. \quad (1)$$

ГОСТ 31825-2012 не учитывает структурные изменения при изнашивании элементов конструкции штанговых насосных установок в процессе их эксплуатации. Важно учитывать не только максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$  в теле штанги за цикл нагружения, но и амплитудное напряжение  $\sigma_a$ .

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\min}$  – минимальное напряжение в теле штанги, формируемое за цикл нагружения.

Практика показывает, что на ресурс работы штанговых насосных установок в большей мере влияет не значение действующих напряжений  $\sigma_{пр}$ , а то, с какой частотой и периодичностью они воздействуют. В реальных условиях эксплуатации штанговых насосных установок штанги с изношенной частью при возвратно-поступательном движении совершают колебательные действия, что существенно увеличивает частоту, интенсивность и периодичность формирования амплитудных напряжений  $\sigma_a$  (2), тяжело поддающиеся вероятностной оценке. Для снижения вероятности влияния неучтенных факторов при исследовании напряжений, концентрируемых в штанговых насосных установках с изношенными штоками, период интенсивности формирования амплитудных напряжений  $\sigma_a$  принят равным диапозону варьирования циклов качания станка-качалки за сутки.

Конструктивные особенности металлических штанг с приваренными и затем технологически высажеными головками создают локальные зоны концентрации напряжений в процессе длительной эксплуатации, что приводит к технологическим авариям. Следовательно, для повышения энергоэффективности станка-качалки необходимо разработать устройство, обеспечивающее точность позиционирования изношенных элементов штанговой насосной установки и перераспределения моментов действующих сил в соответствии с энергоемкостью такта. Попытки по снижению ударных нагрузок особых успехов не имеют. В добывающей практике применяют два основных способа: изменение передаточного отношения между



электродвигателем и ведущим валом редуктора; установка вариатора. Недостатки таких способов заключаются в невозможности автоматического регулирования производительности скважины, наличии шкивов разного диаметра, высокой энергоемкости процесса добычи на всем цикле работы насоса, необходимости в глушении скважины во избежание неконтролируемого выброса жидкости, недоборе нефти в период простоя, что ведет к незапланированным вынужденным затратам подземного ремонта и аренды агрегатов для глушения скважин [4].

На основании указанных технических и технологических недостатков станков-качалок первостепенная задача состоит в применении систем автоматического регулирования хода штанги для управления производительностью, а также ограничения и перераспределения динамических нагрузок. Решить данную задачу можно за счет использования технологического комплекса по перераспределению мощности и энергии качалки по ее элементам в зависимости от энергоемкости процесса, сохраняя соосность и проектную траекторию движения штока. Концепция реализации задач основана на использовании энергии сил и моментов собственных масс тяжеловесного рабочего оборудования с последующей ее рекуперацией. Под рекуперацией в статье понимается преобразование механической энергии головки балансира, передаваемой через гидравлическую часть электрогидроцилиндра в электрическую энергию, накопление ее в аккумуляторе и возврате в цепь для работы электрогидроцилиндра в режиме усилителя. Принципы управления мощностью станков-качалок при энергоемких тактах сконцентрированы на применении гибридных приводов. Перспектива развития мехатронных систем обусловлена возможностью проводить самодиагностику привода «станок-качалка» на удалении от технических пунктов.

Технологии добычи, транспортировки и переработки георесурсов требуют нового качественного подхода при проведении исследований и разработке эффективных методов и систем точного позиционирования и быстрого действия привода при сохранении высоких силовых и мощностных характеристик.

Сделано теоретическое предположение о том, что разработка и внедрение системы управления энергосберегающим приводом скважинного штангового насоса с разработкой энергоэффективного гибридного электроцилиндра рекуперативного действия повысит мощностной потенциал привода и ресурсную долговечность комплекса. На первом этапе исследований при модернизации прототипа силового привода необходимо обосновать критерии энергоэффективности. Научно-техническая проблема заключается в том, что при моделировании конструкции ее структурные элементы должны создавать замкнутый контур и прочные связи между двумя разнородными системными средами: электропривода и гидропривода. Особенность исследований заключается в том, что критерии энергоэффективной работы двух систем формируют принципиально разные технико-эксплуатационные показатели. Далее исследовалось влияние зависимости

конструкционных и технологических параметров гибридного привода на эксплуатационные характеристики добывающего комплекса [8, 9].

Основными критериями, определяющими эффективность работы гидропривода буровых установок и наземных приводов нефтедобывающих комплексов, являются его номинальная мощность, достаточная для преодоления сил сопротивления жидкости, перепады давления на гидроэлементах, пульсация потока рабочей жидкости, время гашения амплитуды колебаний, сила на штоках гидроцилиндра и его удельная энергоемкость. Действие динамических нагрузок, потери мощности на преодоление сил сопротивления собственных масс оборудования, нестабильность процессов в напорной магистрали гидросистемы, условия эксплуатации оказывают существенное влияние на энергоэффективность процесса добычи [9, 10]. Исследованиями установлено, что на энергоемкость станка-качалки и эффективность его гидропривода при добыче углеводородов в большей степени влияют технологические параметры, режимы нагружения и конструктивные особенности силовых гидроцилиндров, оптимизировать которые по ряду факторов очень сложно [10, 11]. Следовательно, для установления основных принципов перераспределения мощности по силовым элементам привода необходимо исследовать технико-эксплуатационные особенности насосного добывающего комплекса «станок-качалка».

#### **Исследование технико-эксплуатационных особенностей насосного добывающего комплекса «станок-качалка»**

Для эффективного управления процессом перераспределения мощности привода по нагруженным элементам станка-качалки разработана конструкция с многоэлементной структурой многофакторных сред рекуперации энергии в виде гибридного энергоэффективного электрогидроцилиндра. В конструкции имеется стержень с угловыми проточками шнекового типа, телами качения в сопряжениях, блок преобразования и модуль рекуперации энергии. Обоснованное размещение предложенной конструкции гибридного электроцилиндра и модернизация элементов насосного комплекса обеспечит эффективную систему управления энергосберегающим приводом скважинного штангового насоса.

По результатам экспериментальных исследований скважинного штангового насоса на мало- и среднедебитных скважинах месторождений Карачаганак, Кашагана, Тенгиза, Узень, и Карамандыбас республики Казахстан установлено, что на энергоемкость буровой и станков-качалок оказывает влияние перемещение собственных масс тяжеловесного оборудования. Работа насосных установок в циклическом неустойчивом режиме сопровождается высокими динамическими нагрузками в интервале времени  $\Delta t$  преодоления сил сопротивления подвижных элементов штанговых насосных установок [11, 12]. Период изменения нагрузки на приводе непостоянен во времени и зависит от интенсивности формирования амплитудных напряжений в элементах скважинного штангово-

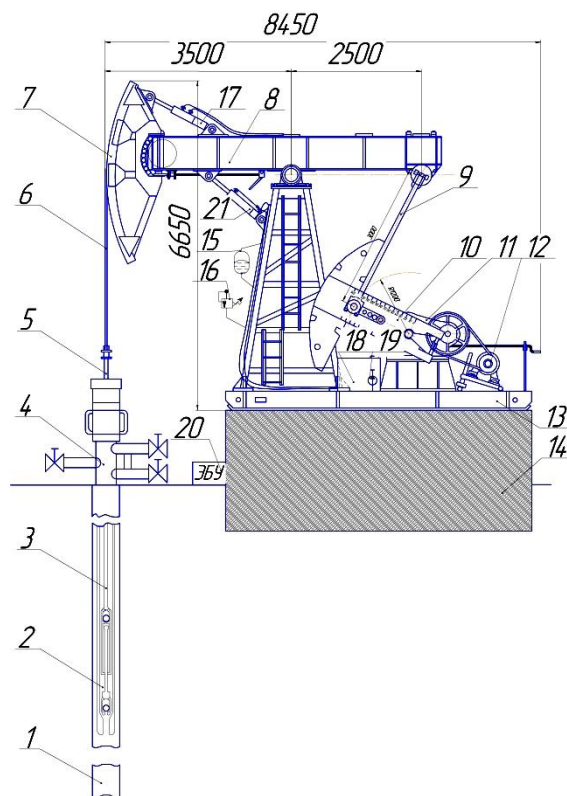
го насоса. Степень эффективного распределения энергии и мощности, затраченной на преодоление сил сопротивления, напрямую зависят от равномерности перемещения подвижных частей в критических режимах (разгон–ускорение–торможение).

В настоящее время эффективность перемещения подвижных элементов в основном зависит от динамических, силовых и мощностных характеристик насосного комплекса и буровых установок, кинематики головки балансира, траверсы и конструктивных особенностей энергосберегающего привода [13]. При добыче георесурсов практика эксплуатации насосных установок сведена в основном к известным принципам использования кинетической энергии. Следовательно, стоит емкая научная задача в исследовании зависимостей между кинетической, потенциальной энергией и характеристиками приводов. Установление корреляционных коэффициентов позволит развить методологию управления кинетической и потенциальной энергией станков-качалок. Обоснованные теоретические положения обеспечат разработку эффективного механизма перераспределения сил тяжести [13, 14]. Предложенный энергосберегающий гибридный привод рекуперативного действия (рис. 1) позволяет не только управлять технологическими режимами, но и, изменяя кинематику устройства, эффективно перераспределять мощность в соответствии с энергоемкостью процесса.

В настоящее время при разработке энергосберегающего привода станций по добыче и переработке георесурсов у исследователей нет единой концепции в обеспечении возможности перераспределять силы гидравлического сопротивления, преобразовать силы тяжести собственных масс оборудования в полезную работу и аккумулировать энергию рабочей жидкости гидроривода [14, 15]. Обеспечить баланс энергоэффективного перераспределения мощности по элементам насосного комплекса предлагается уравновешиванием центра масс рабочего оборудования путем внедрения электрогидроцилиндра рекуперативного действия [16]. Разработанный гибридный электрогидроцилиндр – 17, установленный на насосном комплексе, управляет работой привода с учетом динамики действующих сил тяжести и момента в разных диапазонах углов наклона головки балансира – 7 и траверсы – 8. При изменении угловых координат головки балансира – 7 и траверсы – 8 в разные интервалы времени  $t_i$  изменяются и значения моментов сил сопротивления поднятию лифта вязкой жидкости насосом – 2.

Следовательно, в зависимости от энергоемкости работ в цикле можно рационально управлять расходом мощности привода и силовой установки качалки (рис. 1), избирательно обеспечивая (max–min) расход мощности только в максимальный момент нагрузок.

Исследованиями [17, 18] установлены периоды и положение рабочего оборудования «качалки», при которых требуются значительно меньшие усилия и мощность для совершения того же заданного объема работы.



**Рис. 1.** Станок-качалка с системой энергоэффективного привода распределения мощности силовых агрегатов: 1 – колонна обсадная; 2 – насос-плунжер; 3 – штанги насосные возвратно-поступательного действия; 4 – запорная арматура скважины; 5 – шток полировочный; 6 – подвеска гибкая; 7 – головка балансира; 8 – балансир-траверса; 9 – шатун; 10 – кривошип; 11 – редуктор; 12 – электродвигатель; 13 – рама; 14 – фундамент; 15 – гидровакуумный аккумулятор; 16 – предохранительный клапан; 17 – электрогидроцилиндр; 18 – гидробак для рабочей жидкости; 19 – гидронасос; 20 – электронный блок управления (ЭБУ); 21 – нижний гидроцилиндр

**Fig. 1.** Pump jack with energy-efficient drive system for power distribution of power units: 1 – casing column; 2 – pump; 3 – sucker-rod; 4 – wellhead equipment; 5 – piston rod; 6 – cable hanger; 7 – mule-head hanger; 8 – horse head; 9 – rocker arm; 10 – yoke; 11 – reduction gear; 12 – electric motor; 13 – frame group; 14 – understructure; 15 – hydro vacuum battery; 16 – pop-off valve; 17 – electro hydro cylinder; 18 – hydraulic tank for actuating fluid; 19 – hydraulic pump; 20 – electronic control package (ECP); 21 – lower hydro cylinder

Как известно, силы вязкостного сопротивления пропорциональны скорости относительного движения жидкости и штанг, жидкости и НКТ и их максимальное значение наблюдается при максимальной скорости движения штанг и плунжера, т. е. ближе к середине хода. Однако, если условно разделить движение штока на три временных интервала ( $t_1$  – разгон, момент отрыва штока от вязкостной пленки флюида,  $t_2$  – установившееся движение штока и  $t_3$  – замедление штока), наблюдаются изменения распределения

сил сопротивления. В период движения штока  $t_1$  необходимо преодолевать силы вязкостного сопротивления покоящейся жидкости, имеющей высокую парафинистую плотность в условиях низких температур. В момент начала движения штока  $t_1$  гигроскопичность и высокая вязкость парафинистой жидкости создают «обратный–всасывающий» эффект, преодоление которого происходит при нарастающей мощности привода. Однако скорость штока остается низкой. При дальнейшем движении шток, преодолевая силы вязкостного сопротивления, увеличивает скорость движения ближе к середине хода и достигает установившегося движения  $t_2$ . В период  $t_2$  при относительно постоянной скорости штока мощность привода, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления, снижается. На длине максимального хода штока происходит его замедление, что соответствует режиму  $t_3$ .

Описанный режим движения штока объясняет тот факт, что на динамограммах при откачке вязкой и парафинистой продукции максимум нагрузки смещается ближе к середине хода. Необходимо отметить, что данный факт справедлив для эксплуатации новых технически исправных скважных штанговых насосов. При интенсивном изнашивании штока его прямолинейное возвратно-поступательное движение нарушается за счет отклонения штока от оси сопряженной детали. В этом случае динамические нагрузки распределяются неравномерно, соответственно и режим работы привода также необходимо изменять адаптивно к амплитуде нагружения. Амплитудные нагрузки в начале хода могут быть связаны с тиксотропными свойствами добываемых жидкостей, приводящими к росту вязкости покоящейся жидкости. Установлено, что максимальная мощность требуется в интервале такта от начала подъема плунжера насоса – 2 до середины хода, когда возникают максимальные силы вязкостного сопротивления парафинистого столба нефтяного флюида в насосно-компрессорной трубе – 1. В этот момент электродвигатель – 12 и привод (редуктора – 11 и гидронасоса – 19) работают при максимальных нагрузочных режимах, выполняя силовые установки. В момент установившейся скорости движения нефтяного флюида в колонне – 1 при полностью открытом нагнетательном клапане требуются минимальные затраты мощности привода – 11, 19 и электродвигателя – 12. В момент опускания штанги – 3 насоса – 2 помогает сила тяжести собственных масс рабочего оборудования головка балансира – 7 и траверса – 8. В этот момент полезной мощности привода требуется незначительно, но только до момента закрытия нагнетательного клапана. Далее, при возврате оставшегося объема нефти в НКТ – 1, в конце третьего такта ( $t_3$  – период торможения), возрастает влияние гидравлического сопротивления вязко парафинистого столба и тиксотропных свойств жидкости. При стремлении штанги – 3 протолкнуть его через узкие диаметры отверстий нагнетательного клапана резко возрастает напряжение и давление, приводящие к усталостному разрушению штанг – 3. Данный такт цикла сопровождается резким увеличением мощности, затрачиваемой на

преодоление сил сопротивления и выполнение полезной работы. В этот момент важно не столько снизить мощность привода – 11, 19 и электродвигателя – 12, а перераспределить мощность по временным интервалам  $t_i$ , соответствующим нарастанию  $max$  сопротивления.

Таким образом, электрогидроцилиндр – 17 позволяет обеспечить гибкое управление мощностным балансом и перераспределением мощности по элементам станка качалки – 11, 12, 17, 19, 21 с учетом энергоемкости процесса. Кратность хода штока – 5 насоса – 2 по средствам электрогидроцилиндра и ЭБУ – 20 будет регулироваться автоматически в зависимости от дебита скважины, угла наклона траверсы – 8, моментов сил инерции и скорости хода штока – 5 ШГН – 2.

Принцип эксплуатации энергоэффективного привода глубинного штангового насосного комплекса (рис. 1) заключается в перераспределении мощности электродвигателя – 12 и привода – 11, 19 в соответствии с энергоемкостью такта добычи. В момент включения силового привода электродвигателя – 12 приводная часть траверсы – 8 начинает перемещаться вниз, а левое плечо, на котором путем зубчатого зацепления расположена подвижная головка балансира – 7 и траверса – 8, перемещается в верхнем направлении.

Вследствие этого зачальный конец каната – 6, перемещаясь вверх, приводит в действие направляющую штангу – 3 насоса – 2, обеспечивая движение штока – 5 и плунжера, открывая магистральный клапан. С целью регулирования производительности станка-качалки гибридным электрогидроцилиндром – 17, закрепленным на балансир-траверса – 8, обеспечивается изменение двойного хода штанги – 3 путем радиусного поворота головки балансира – 7 и балансир-траверса – 8 на заданный угол наклона проектной оси головки балансира – 7. При возникновении критического напряжения на штанге – 3 насоса – 2 при прокачке высоковязкого нефтяного флюида датчик крутящего момента, установленный на оси головки балансира – 7, считывает крутящий момент и передает сигнал на ЭБУ – 20. Идентифицируя сигнал, ЭБУ – 20 интерпретирует его и передает управляющее воздействие на гибридный электрогидроцилиндр – 17. Последний исполняет команду ЭБУ – 20 за счет электромагнитного контура, который, в свою очередь, замедляет движение головки балансира – 7 или передает сигнал на контроллер ЭБУ – 20 и останавливает насос-качалку. Таким образом предотвращается заклинивание штока – 5 плунжера и его усталостный износ.

Перераспределение мощности силовой установки электродвигателя – 12 реализуется верхним гибридным электрогидроцилиндром – 17 и нижним гидроцилиндром – 21. В момент возрастания сопротивления при движении сопряженных деталей ШГН – 2 при высоковязких компонентах нефти для выполнения того же объема работ требуется большая мощность электродвигателя – 12.

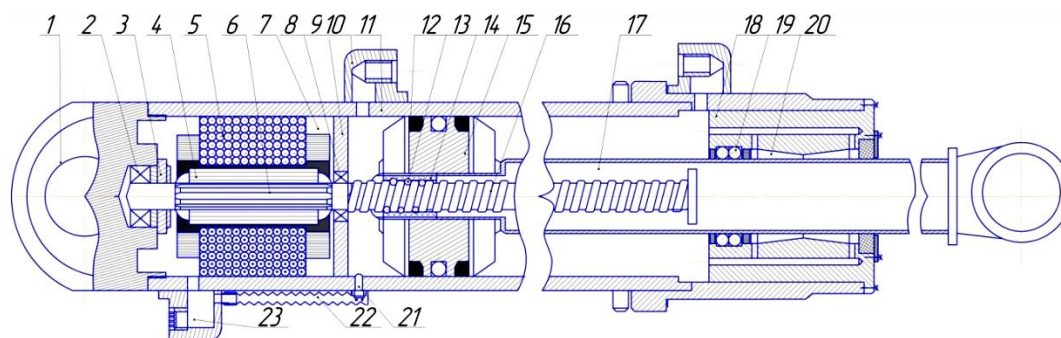
Датчик момента подает сигнал на блок управления – 20 и гибридный электрогидроцилиндр – 17, который начинает работать как усилитель и создает до-

полнительную силу для поднятия штока – 5 и поворачивает на дополнительный угол наклона головку балансира – 7. Такое действие дополнительных сил электрогидроцилиндра – 17 разгружает электродвигатель – 12 привода – 11, 19, экономя энергию. При установившихся стабильных режимах работы насоса-качалки не требуется работы электродвигателя – 12 на полной мощности и блок логики ЭБУ – 20 автоматически снижает обороты силовой установки электродвигателя – 12. Насосный комплекс переключается на энергосберегающий режим. Данный режим обеспечивается работой гибридного электрогидроцилиндра – 17 и гидроцилиндра – 21, расположенных с обеих сторон мачты. Гибридный электрогидравлический цилиндр – 17 и гидроцилиндр – 21 работают параллельно, обеспечивая синхронное перемещение головки балансира – 7 и траверсы – 8 с учетом изменения сил сопротивления и тягового момента на штанге – 3 насоса – 2, автоматически перераспределяя мощность электродвигателя – 12 по тяговым элементам конструкции. Редуктор – 11, электродвигатель – 12, электрогидравлический цилиндр – 17 и гидронасос работают в энергоэффективном режиме. В момент запуска насоса – 2 при резком ускорении штанги – 3 и сопряженных деталей ШГН – 2 гибридный электрогидравлический цилиндр – 17 за счет электромеханической части перераспределяет рабочий момент сил по элементам траверсы – 8 и подвижной головки балансира – 7. Гидравлическая часть электрогидроцилиндра – 17 создает дополнительную толкающую и тянущую силы (ГОСТ 18464-96 межгосударственный стандарт «Гидроприводы объемные гидроцилиндры. Правила приемки и методы испытания»), помогая преодолевать сопротивления силы трения вязкой среды. Эта же система гибридного привода путем перераспределения гидравлической жидкости и крутящих моментов позволяет эффективно использовать соб-

ственную массу рабочего оборудования – 7, 8 станка-качалки. Перемещаясь вниз, головка балансира – 7 и траверса – 8 своей массой и силой инерции обеспечивают обратный ход штока гидроцилиндра – 21, перемещая гидравлическую жидкость в гидрораспределитель, или гидровакуумный аккумулятор – 15, в котором срабатывает диафрагма и под высоким давлением происходит аккумуляция жидкости. При возврате в исходное верхнее положение головки балансира – 7 и траверсы – 8, гидронасос – 19 и силовая установка в виде электродвигателя – 12 соответственно работают на средних режимах. Номинальные значения давления, мощности и тягового момента траверсы – 8, необходимые для стабильного завершения полезной работы, обеспечиваются путем их компенсации за счет срабатывания гидровакуумного аккумулятора – 15 и электрогидроцилиндра – 17, который работает как усилитель. Предложенная конструктивно-технологическая схема (рис. 1) эксплуатации станка-качалки на малодебитных скважинах существенно повышает ее производительность, ресурсную долговечность и снижает энергоемкость процесса добычи углеводородов.

#### Разработка, проектирование и исследование эффективности гибридного электрогидроцилиндра рекуперативного действия

Разработанное устройство (рис. 2) предназначено для преобразования энергии и аккумуляции ее в конструкции гидрофицированных и гибридных машин, а также для эффективного управления траекторией движения каждого элемента рабочего оборудования станка-качалки. Конструкция эффективна в условиях значительных динамических нагрузок при подъеме нефтяного флюида с насыщенными асфальтосмолистыми парафинистыми отложениями (АСПО) при низких температурах парафинизации.



**Рис. 2.** Электрогидроцилиндр рекуперативного действия [16]: 1 – посадочное отверстие для пальца; 2 – подшипник качения; 3 – датчик скорости и крутящего момента (совмещенный); 4 – ротор; 5 – статор; 6 – шлицы вала; 7 – камера рекуператора; 8 – промежуточный подшипник; 9 – разделительная перегородка; 10 – впускной штуцер прямого хода; 11 – гильза (цилиндр); 12 – кольцо уплотнительное; 13 – опорные шарики; 14 – шариковая гайка; 15 – поршень; 16 – винтовой стержень; 17 – шток цилиндра; 18 – втулка направляющая; 19 – направляющая качения; 20 – каналы конфузورные и диффузорные; 21 – датчик давления в поршневой полости; 22 – гофрированный пыльник; 23 – разъем для подключения к источнику питания [16]

**Fig. 2.** Electro hydro cylinder of recuperative drive [16]: 1 – mounting bore for a finger; 2 – antifriction bearing; 3 – speed and rotational moment transducer (to be joint); 4 – rotor; 5 – stator; 6 – shaft spline; 7 – recuperator compartment; 8 – intermediate bearing; 9 – partition wall; 10 – inlet connection of forward stroke; 11 – sleeve (cylinder); 12 – gasket ring; 13 – holdout balls; 14 – ball nut; 15 – plunger; 16 – screw-shaped rod; 17 – cylinder rod; 18 – fairlead bush; 19 – slideway bearing; 20 – converging and diffuser ducts; 21 – pressure sensitive element in the piston side; 22 – corrugate dust guard; 23 – connector for hooking up to a power source [16]

При добыче углеводородного сырья с высокой парафинизацией за счет тиксотропных свойств жидкости в сопряжениях ШГН – 2 скважины (рис. 1) формируются силы сопротивления нефти, которые передаются на рабочий орган и элементы наземного оборудования – 8–10 качалок. В период подъема нефтяного флюида на элементы привода – 11, 12, 19 насосного комплекса – 2 воздействуют силы динамических колебаний. Наибольшая концентрация динамических нагрузок приходится на приводные части насоса – электрогидроцилиндр – 17 и гидроцилиндр – 21. При давлении от 28 до 32 МПа жидкость под действием динамических сил, распределенных по контактной площади поршня – 12 по входному штуцеру прямого хода – 10, приводит в движение механизм, обеспечивая поступательное перемещение (рис. 2) [19]. Одновременно шариковая гайка – 14, находясь в постоянном зацеплении с винтовой контактной поверхностью, под влиянием крутящего момента  $M_k$ , придает вращение стержню – 16, далее в рекуперативной системе – 7 создается электромагнитное поле. Ротор – 4 рекуператора передает вращательное движение стержню – 16 и через шариковую муфту вращательное движение ротора преобразуется в возвратно-поступательное поршня – 12, который, перемещаясь поступательно, через шток – 17 передает толкающую или тяговую силу на рабочий орган – головку балансира.

За счет применения направляющей втулки – 18 с телами качения – 19 тангенциальные силы и моменты равномерно перераспределяются и тем самым уменьшают влияние сил трения в парах сопряжения – 17, 19. Предложенные технологические каналы – 20 конфузорного и диффузорного типа дифференцированно создают гидравлическое давление по конусному сечению и обеспечивают центрирующую силу для проектно-осевого перемещения рабочего штока [16]. При интенсивном изнашивании поверхности штока – 17 в сопряжении «шток – направляющая качения» гидравлическая жидкость по каналам перемещается в конфузорно-диффузорные каналы – 20. В полости под действием закона Бернулли давление жидкости распределяется неравномерно по конусному объему, обеспечивая центрирование изношенного штока. Этот эффект обеспечивает соблюдение первоначальных технических требований к прочностным и эксплуатационным параметрам электрогидроцилиндра рекуперативного действия, повышая ресурсную долговечность силового агрегата при неизбежном эксплуатационном изнашивании сопряжений. В момент действия динамических нагрузок и сил тяжести собственных масс оборудования насоса-качалки в поршневом пространстве дифференцировано изменяются объем  $V_i$  и необходимое для работы давление  $P_i$  [19]. Встроенный датчик давления измеряет разницу давления  $\Delta P_i$  и передает сигнал на логический контроллер – 20 (рис. 1). Синхронно шариковая гайка – 14 по спиралевидным технологическим каналам преобразует поступательное движение поршня – 12 во вращательное движение винтового стержня – 16. Вращаясь, стержень передает приобретенный потенциал энергии ротору – 4 статора – 5 электроусилителя. В системе

модуля накопления и преобразования энергии – 7 электродвижущая сила зависит от давления жидкости  $\Delta P$ , воздействующего на поршень – 12. На данном этапе в работу вступает датчик скорости и крутящего момента – 3. Через блок логики идентификационный сигнал на модуль электроусилителя передается как корректировочный. При этом угловая скорость ротора – 4 достаточная для возврата поршня – 12 в первоначальное положение. Пространственное положение балансира и траверсы насоса-качалки в этот момент соответствует оптимальным координатам позиционирования на энергонапряженных тактах технологического цикла. Предложенный принцип обеспечивает перераспределение мощности по наиболее энергоемким операциям с учетом действующих сил непостоянных динамических процессов оборудования «насос-качалка». Такой подход позволяет максимально эффективно использовать силы и моменты тяжести собственных масс при разных углах наклона. Таким образом, частично решена научно-техническая проблема перераспределения мощности по энергоемким операциям и использование потенциальной энергии тяжелых элементов нефтедобывающего комплекса.

При перемещении головки балансира – 7 и траверсы – 8 станка-качалки вниз (рис. 1) возрастает действие нагрузки от сил тяжести масс оборудования и давления системы. Действие динамических нагрузок непостоянно во времени такта, и поршень – 15 перемещается вниз (рис. 2) с колебательными амплитудами. Далее поршень – 15 посредством спиралевидного стержня и ротора – 4 передает мощность рабочей жидкости системе рекуперации. Таким образом, при возрастании сил сопротивления в механизмах насосного комплекса предложенный модуль электросистемы работает по принципу генератора. А в максимально напряженных тактах накопленная энергия распределяется по исполнительным механизмам, обеспечивая дополнительные силы и тяговые моменты, исключая необходимость получения высоких значений давления системы. В результате кинетическая энергия механической и гидравлической среды преобразуется в электрическую и аккумулируется [16–19]. В предложенной концепции управления гибридным приводом четко структурирован механизм проектного позиционирования рабочих звеньев – 7, 8 насосного комплекса в оптимальном энергоэффективном положении координат. При подъеме столба нефтяного флюида, насыщенного парафинистой нефтью, в штанговом насосе – 2 в сопряжениях прецизионных деталей из-за асфальтосмолистых и парафинистых отложений возрастают силы, препятствующие движению, что приводит к резкому возрастанию давления в поршневой полости.

Эксплуатация гибридного привода позволяет перераспределять мощность установок станка-качалки, а компенсационный эффект рекуперативной системы – 7 снижает потребление энергии. В этом технологическом цикле система выполняет функции электроусилителя [20]. Перераспределяя накопленную энергию по временным интервалам, электроусили-

тель формирует дополнительную силу и создает дополнительный крутящий момент, преодолевающий силы сопротивления, на стержне – 16. При действии возрастающих сил сопротивления от парафинистосмолистых отложений дополнительно подключается к работе системы гидровакуумный аккумулятор – 15. Действующее давление жидкости из мембранной полости дополняет суммарное давление действующего контура, тем самым разгружая электродвигатель – 12, редуктор – 11 и гидронасос – 19 (рис. 1).

Разработанное гибридное устройство (рис. 2) решает научную проблему обоснования критериев эффективности работы добывающего комплекса при сложной структуре гибридного привода. И решена техническая проблема обеспечения высокой энергоэффективности гибридного привода наземного нефтедобывающего насосного комплекса за счет перераспределения мощности привода по энергоемким операциям. Предложенный электрогидроцилиндр рекуперативного действия представлен в виде сложной по структуре системы, воспринимающей силовые нагрузки, поэтому произведен силовой расчет основных элементных систем [19].

Как показывают результаты исследования, основные силы сопротивления возникают при включении в технологический процесс добычи гидроцилиндров балансирующего и траверсного оборудования, при этом перепад давления на входе  $P_{вх}$  и выходе  $P_{вых}$  составляет  $\Delta P=4,5...5,7$  МПа в зависимости от режима работы [18]. В гидроприводах силовые машины – гидродвигатели – имеют самый значительный коэффициент потери давления  $\psi=0,25...0,26$ . Давление в гидросистеме предложенной насосной установки при функционировании рабочего оборудования составляет  $P=15$  МПа. Мощность привода добывающего комплекса, затрачиваемая на выполнение полного цикла работ при добыче нефти, составит  $N_p=76$  кВт. Время исполнения полного хода гидроцилиндров с учетом загруженности и преодоления сил сопротивления парафинистых отложений в магистральных сопряжениях ШГН формирует производительность добывающих комплексов малодебитных скважин. В технических условиях ГОСТ 31825-2012 интервал эффективной работы принимается равным общему времени цикла (с). Время цикла формируется суммой времени работы в ручном и автоматическом цикле. В состав расчета общего времени цикла станка-качалки входит время смены инструмента и интервал между сменами. Такой подход, как правило, применим для расчета производительности, КПД и выбора количества необходимого оборудования станков-качалок. Но для исследования процессов усталостного износа, происходящих в структурных элементах насоса, данный цикл слишком длителен во времени. Поэтому для последующих расчетов усталостных напряжений, формируемых в сопряжениях насоса, необходимо знать цикличность срабатывания каждого подвижного элемента в отдельности (шток, штанга и плунжер). Определение времени цикла «станок-качалка»  $T_{ц}$  осуществлялось с учетом множества факторов, воздействующих в реальных условиях эксплуатации (вязкость и плотность нефти, глубина спуска

насоса, максимальная нагрузка на штоке, тип привода, система управления и т. д.). В зависимости от перечисленных факторов и кинематики станка-качалки время цикла варьируется от 21...24 с. По результатам расчета общее время цикла большинства применяемых станков-качалок  $T_{ц}$  при опускании штанги на полную глубину скважины составило 22,37 с.

Появление дополнительных возможностей увеличения полезных сил в гидроцилиндре повысит скорость полного хода. Также данное устройство компенсирует действие собственной массы балансирующей головки и траверсы при опускании или подъеме оборудования, что существенно снижает напряжение в стенках цилиндра (3)

$$\sigma = P_{\max} \frac{Db_k}{D_H Db_k}, \quad (3)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное давление в гидроцилиндре траверсы балансира;  $Db_k$  – внутренний диаметр гидроцилиндра;  $D_H$  – наружный диаметр гидроцилиндра,  $\sigma=87,5$  МПа [19].

Запас прочности с учетом предела текучести материала штока, изготовленного из стали 30ХГСА, составит  $n=9,7$ . Определим область локализации усталостного износа в элементах насоса-качалки (4).

Формируемые внутренние напряжения изгиба (4) в штоке с применением электрогидроцилиндра [19]:

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{f \varphi}, \quad (4)$$

где  $f = \frac{\pi d_{ш}^2}{4}$  – площадь сечения штока, см<sup>2</sup>;  $\varphi$  – коэффициент уменьшения допускаемого напряжения. Внутреннее напряжение  $\sigma$  в основном сечении штока электрогидроцилиндра снизилось до 46,4 МПа.

Внедрение разработанного электрогидроцилиндра и его кинематически обоснованное размещение на рабочем оборудовании насосного добывающего комплекса на 17,4 % снижает необходимость выработки давления гидронасоса  $\Delta P=2,58$  от стандартного. Для перемещения поршня гидроцилиндра при выполнении заданного объема работ требуется значительно меньшее давление гидронасоса, т. е.  $P_H=12,4$  МПа. Значит, во всем цикле эксплуатации добывающих комплексов электрогидроцилиндр обеспечивает эффективное действие станка-качалки. Компенсационное распределение сил позволит снизить напряжения  $\sigma$  в стенках цилиндра, потребляемую мощность редуктора – 11 (5) и обеспечить экономию мощности (6) в силовой установке – 12 (рис. 1) за счет синхронной работы гибридной системы.

$$N_p^{\text{эф}} = \frac{(P_H Q_H) - (M_p n_{цс})}{45 \eta_p \eta_{нм}}, \quad (5)$$

где  $P_H$  – номинальное давление гидронасоса, МПа;  $Q_H$  – максимальная подача насоса, Мпа;  $M_p$  – момент ротора при рабочей частоте вращения, Н·м;  $n_{цс}$  – частота вращения центрального стержня цилиндра, об/мин;  $\eta_{нм}$  – КПД, характеризующий механические потери;  $\eta_{рп}$  – КПД электрорекуператора усилителя.

Используя предложенное равенство, установлено, что общая эффективная мощность гибридного привода составит  $N_p^{эф} = 89,2$  кВт, резервная мощность, вырабатываемая рекуператором электроусилителем, составляет  $\Delta N_{гн} = 13,1$  кВт. Следовательно, при технической возможности снижения затрат мощности привода и появления накопительной мощности  $N_{гн} = 13,1$  кВт в системе рекуперации исключается необходимость в использовании силовой установки на максимальной мощности, что позволяет изменить режимы работы силового агрегата с меньшими мощностными затратами. Значит, мощность двигателя  $N_{ев}$ , кВт, требуемую для эффективной работы добывающего комплекса, определим:

$$N_{ев} = \frac{N_{G_{max}} + N_{B_{max}}}{\zeta_{гн}}, \quad (6)$$

где  $\zeta_{гн}$  – КПД глубинного насоса;  $N_{G_{max}}$  – мощность, расходуемая на преодоление гидравлического сопротивления потока асфальтосмолистой нефти, кВт;  $N_{B_{max}}$  – мощность, расходуемая на преодоление воздушного сопротивления, кВт.

Энергетический потенциал штангового насоса, достаточный для преодоления действующих сил сопротивления турбулентного потока асфальтосмолистой нефти, выразим через требуемую мощность  $N_{G_{max}}$ , кВт (7) [19]:

$$N_{G_{max}} = \frac{G_{р.об} \cdot f_{гн} \cdot v_{max}}{3,6}, \quad (7)$$

где  $G_{р.об}$  – вес рабочего оборудования с нагрузкой всасывающей магистрали скважины, Н;  $f_{гн}$  – коэффициент гидравлического сопротивления потока рабочей жидкости гибридного цилиндра;  $v_{max}$  – максимальная скорость движения поршня, м/с [19].

Одной из важных функциональных задач гибридного гидроэлектроцилиндра является распределение мощности в соответствии с энергоемкостью процесса (8). Его энергоемкость будет зависеть от множества вероятностных факторов, один из которых изменение массы рабочего оборудования  $G_{р.об}$  и скорости движения поршня  $v_{max}$  привода ШГН. Таким образом, принцип изменения затраченной мощности  $N_{G_{max}}$  можем исследовать методом дифференцирования  $N_{G_{max}}$  по  $G_{р.об}$  и  $v_{max}$  (8).

$$\begin{aligned} \left( N_{G_{max}} \right)_{G_{р.об}}' &= \frac{f_{гн} \cdot v_{max}}{3,6}, \\ \left( N_{G_{max}} \right)_{v_{max}}' &= \frac{G_{р.об} \cdot f_{гн}}{3,6}. \end{aligned} \quad (8)$$

При эксплуатации насосного комплекса важной составляющей является определение мощности воздушного сопротивления площади рабочего оборудования  $N_{B_{max}}$ , кВт, станка-качалки, которую определяем из равенства:

$$N_{B_{max}} = \frac{W_B \cdot v_{max}^3}{46800},$$

где  $W_B$  – коэффициент аэродинамического воздействия сил на единицу площади (фактор обтекаемости оборудования),  $H \cdot c^2/m^2$ ,

$$W_B = k_B \cdot F,$$

где  $k_B$  – коэффициент сопротивления воздуха,  $H \cdot c^2/m^4$ ;  $k_B = 0,5 \dots 0,7$ ;  $F$  – площадь бокового сопротивления рабочего оборудования,  $m^2$ .

В классической схеме привода мощность силовой установки, необходимая для выполнения заданного объема работы станком-качалкой, составляет  $N_{ев} = 102$  кВт [19]. Таким образом, реализуя системный подход в исследовании энергоэффективности добывающего комплекса, получено равенство, наиболее полно описывающее необходимую эффективную мощность привода (9). Требуемая мощность двигателя для работы комплекса с предложенным энергоэффективным электрогидроцилиндром и гибридным приводом:

$$N^{э.эф.}_{ев} = \frac{N_{G_{max}} + N_{B_{max}}}{\zeta_{гн}} - \frac{M_{max} \cdot n}{\eta_{двс}}, \quad (9)$$

где  $M_{max}$  – максимальный момент двигателя, Н·м;  $n$  – частота вращения вала, об/мин;  $\eta_{двс}$  – КПД двигателя [19].

С применением гибридного цилиндра эффективного действия мощность двигателя, затраченная на выполнение заданного объема работ, составляет  $N_{ев}^{э.эф.} = 73,7$  кВт.

Применение в эксплуатации электрогидроцилиндра стабилизирует разнонаправленные моменты рабочего оборудования насосного добывающего комплекса. Синхронизируя работу гидравлической системы электрогидроцилиндра и его электродвигателя, минимизируем влияние сил  $F_j$  инерции и инерционного момента  $M_j$  оборудования (10) [19].

$$M_j = J_z \frac{d\omega_z}{dt} = m_a p_z^2 \varepsilon_z, \quad (10)$$

где  $J_{р.о.z}$  – момент инерции масс рабочего оборудования насоса-качалки относительно оси  $z$ ;  $\omega_z$  – его угловая скорость;  $p_z$  – радиус инерции относительно той же оси;  $\frac{d\omega_z}{dt} = \varepsilon_z$  – угловое ускорение [19].

Любое отклонение рабочего оборудования от проектного позиционирования повышает нагрузку на рабочую жидкость и приводит к росту потерь мощности. Действие дополнительной силы  $F_{доп}$  определим равенством (11):

$$F_{доп} = \sum_{i=1}^{2n} F_{ш.z}^{гн} \cdot f_{доп}, \quad (11)$$

где  $F_{ш.z}^{гн}$  – вертикальная сила, действующая на шток гидроцилиндра;  $f_{доп} = k_y \delta^2 / R$  – дополнительный коэффициент сопротивления качения рабочего оборудования;  $k_y$  – коэффициент увода оборудования от истинных координат;  $\delta$  – угол отклонения оборудования;  $R$  – реакция сил [19].

Падение мощности происходит как следствие преодоления дополнительного момента  $M_d$  сопротивления, образованного от измененного проектного плеча балансира и равного стабилизирующему моменту  $M_{ст}$  (12) [19].

$$M_{ст} R l_k / 6, \quad (12)$$

где  $R_y$  – реакция сил рабочего оборудования;  $l_k$  – длина плеча приложенной силы  $k$  элемента рабочего оборудования.

Далее обоснуем параметры электрогидроцилиндра, обеспечивающие снижение вынужденных колебаний подвижных звеньев насоса-качалки [19, 20]. Комплекс показателей формируют качественные критерии эффективности системы при гармонических колебаниях. Как один из критериев рассмотрим время угасания  $t_{усп}$ , амплитуду колебаний, выраженные равенством (13):

$$t_{усп} = \frac{1}{\beta_a \cdot \omega_0} \ln \frac{1}{\lambda(1 - \beta_a)}, \quad (13)$$

где  $\beta_a$  – коэффициент затухания колебаний;  $\omega_0 = \sqrt{c_T/m}$  – собственная частота затухающих колебаний в гидроцилиндре;  $\lambda$  – коэффициент точности установки рабочего оборудования в положении равновесия;  $c_T$  – коэффициент сопротивления.

Когда поршень начинает колебания от действующей нагрузки центра масс или непреодолимого препятствия (гидроцилиндр ковша), происходит изменение давления жидкости в поршневой полости, которое фиксируется датчиком – 21 (рис. 2), в этот момент ЭДС начинает вращать винтовую стержень, что блокирует движение поршня вниз и включает в работу электроусилитель. При этом вертикальная сила  $F_{ш.з}^{тн} = m_{раб.об.} \cdot j_{раб.об.}$  компенсируется силой сопротивления электроусилителя. При отключении тока с обмотки электроусилителя поршень прекращает компенсационное движение, что соответствует стабилизации моментов рабочего оборудования и предложенного электрогидроцилиндра. Сигналом для подачи тока на обмотку электромагнита служит ускорение поршня гидроцилиндра, равное  $4 \text{ м/с}^2$ . Далее определяется коэффициент интенсивности  $K_{инт}$  колебаний центра масс рабочего оборудования станка-качалки и условия перехода от устойчивого перемещения каждого элемента (балансир, траверса, кривошип и т. д.) к неустойчивому, формула (14):

$$K_{инт} = \frac{18}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2}} \cdot \sigma_0, \quad (14)$$

где  $\sigma_0$  – среднеквадратичное значение вертикального виброускорения;  $\omega_n = 62,8 \text{ с}^{-1}$  – частота приведения;  $\omega$  – частота колебания.

В предложенной системной конструкции электрогидроцилиндра сформировано два контура, создающих синергетические силы. Сложность системы дает основания предположить, что в частной характеристике передаточной функции  $W(S)$  существует неустойчивое звено.

Прежде чем создать устойчивую систему, разомкнем обратные связи, а параметры частотных показателей опишем логарифмической функцией  $W_1(j\omega)$ ,  $W_2(j\omega)$ .

В результате получаем один отрицательный переход:  $-1+0 = -1$ . Преобразование Лапласа представлено символом  $S$  [20].

Далее математически опишем модель изменения частоты и фазовой амплитуды колебаний от факторов, формула (15).

$$W_k(S) = \arctg \left[ \frac{W_1(j\omega)}{1 + W_1(j\omega)W_2(j\omega)} \right]. \quad (15)$$

По результатам расчета для определения логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик строим номограмму замыкания по предложенным принципам построения Никольса.

Выполнив ряд преобразований и воспользовавшись формулой Эйлера, получим выражение, которое раскладываем на действительную и мнимую части. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (зависимость амплитуды  $A_{\Delta p}$  от изменения давления  $p$  в поршневой полости) при вертикальном воздействии масс тяжести рабочего оборудования представлена на рис. 3.

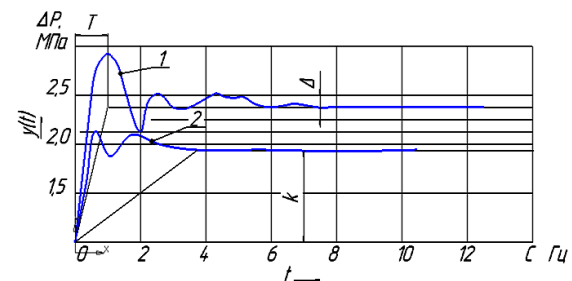


Рис. 3. Переходные процессы при вертикальном возмущении масс рабочего оборудования качалки малодебитных скважин. График компенсации сил тяжести масс рабочего оборудования при использовании: 1 – классического гидроцилиндра; 2 – электрогидроцилиндра

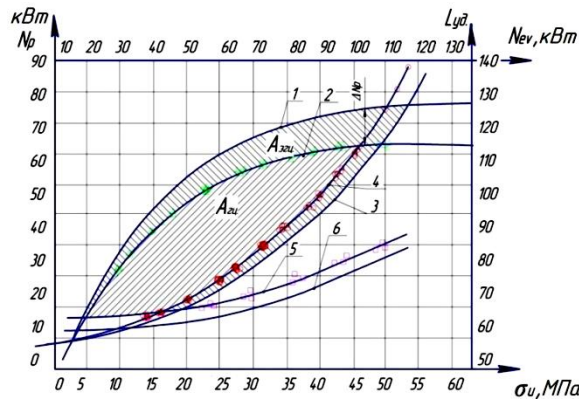
Fig. 3. Transients in the vertical perturbation of the mass of the working equipment pumping unit of low-debit well. The graph of working equipment gravity compensation using: 1 – classic hydraulic cylinder; 2 – electro hydro cylinder

Из рис. 3 видно, что в данном случае наблюдается несколько контуров колебаний при разных соответствующих частотах от 0,5 до 10 Гц. Непостоянные процессы переходных режимов ускорения и установившегося движения при направленном возмущении масс рабочего оборудования станка-качалки малодебитных скважин изображены на рис. 3. Как видим, при классической схеме гидроцилиндра наблюдается длительный процесс наступления стабилизирующего момента  $M_{ст}$ . При использовании насосного комплекса с предложенной конструкцией электрогидроцилиндра процесс срабатывания устройства происходит гораздо быстрее и работа стабилизирующего усилителя значительно эффективнее.

Следовательно, по данным критериям можно обосновать оптимальные параметры электрогидроцилиндра, влияющие на точное позиционирование рабочего оборудования качалки малодебитных скважин, приводящее в действие ШГН.



Модуль разработанной электромеханической системы управления динамикой рабочего оборудования добывающего комплекса должен сочетать функции следящего привода и системы адаптации к динамическим нагрузкам [21–23]. Результаты исследований энергоэффективности электрогидроцилиндра позволили построить номограмму определения эффективной площади, характеризующую энергоёмкость работы, выполняемой электрогидродвигателем.



**Рис. 4.** Номограмма для определения эффективной области работы электрогидроцилиндра эффективного действия  $A_{эфф}$  в зависимости от расходуемой мощности  $N_p$  и  $N_{ев}$ . Графики: 1 – изменения мощности привода при работе гидроцилиндра; 2 – изменения мощности привода при работе электрогидроцилиндра; 3 – выполнения работы гидроцилиндром; 4 – выполнения работы электрогидроцилиндром; 5 – изменения напряжений изгиба в электрогидроцилиндре; 6 – изменения напряжений изгиба в гидроцилиндре

**Fig. 4.** Nomogram for determining the operating window of the electro hydro cylinder effective action  $A_{eff}$  depending on the consumed power  $N_p$  and  $N_{ev}$ . Graph of: 1 – changes in drive power at hydraulic cylinder operation; 2 – changes in drive power at electro hydraulic cylinder operation; 3 – the hydraulic cylinder performance; 4 – electro hydraulic cylinder performance; 5 – bending stress changes in an electro hydraulic cylinder; 6 – bending stress changes in an hydraulic cylinder

Из рис. 4 видно, как изменяется мощностная характеристика привода насоса добывающего комплекса и силовой установки приводного двигателя в сравнении с применением электро- и гидроцилиндров. Из анализа кривых 1 и 2 установлено, что для выполнения заданного объема работ  $A_{уд}=100$  кДж при эксплуатации гидроцилиндра требуется выработать и затратить мощность гидропривода  $N_{гр}=76$  кВт.

Для достижения данных значений параметров гидропривода потребуется затратить мощность двигателя  $N_{ев}=127$  кВт. При этом под действием нагрузок и дополнительных сил сопротивления, как показывает номограмма, внутреннее напряжение в сечении цилиндра и магистральных линиях ШГН возрастает до  $\sigma=55$  МПа. При эксплуатации добывающего комплекса с электрогидроцилиндром эффективного действия обеспечивается перераспределение мощности

по наиболее напряженным элементам насоса. В этом случае затраты мощности для того же объема работ значительно меньше:  $N_{гр}=60$  кВт;  $N_{ев}=112$  кВт. Значение и воздействие напряжения изгиба в электрогидроцилиндре и стенках обсадной трубы глубинного штангового насоса снижается до  $\sigma=40$  МПа. Пересечение графиков (рис. 4) образует площадь, описывающую общую работу штанговой насосной установки «станок-качалка» при энергоёмком процессе всасывания нефтяного флюида с высоким парафинистым концентратом вязких смолистых отложений в магистральных скважинах.

Изменяющиеся значения зависимости  $A_{гц}$  описывают область работы, которую выполняет стандартный гидроцилиндр, а значения площади  $A_{эгц}$  характеризуют затраты мощности, приходящиеся на электрогидроцилиндр эффективного действия. Разница пересечаемых площадей описывает компенсационные значения полезной работы, которую обеспечивает предложенная конструкция за счет рекуперации, преобразования и перераспределения энергии в соответствии с энергоёмкостью процесса, что повышает эффективность насосного комплекса при добыче углеводородов на 23 %. Полученные результаты исследований не противоречат известным положениям теорий изнашивания механизмов машин в зазоре пары трения [24, 25]. Представленные новые зависимости согласуются с закономерностями трения при комбинации скольжения и верчения, установленными В.Ф. Журавлевым [25].

#### Заключение

1. Установлено, что при добыче высоковязкой парафинистой нефти рабочее оборудование станка-качалки потребляет мощность  $N$  на 23 % выше требуемой на выполнение данного объема работ в течение всего цикла. Большая часть энергии станка-качалки (около 60 %) затрачивается на преодоление сил сопротивления сопряжений штанговых глубинных насосов в нефтяном флюиде с асфальтосмолистыми парафинистыми отложениями, что приводит к нерациональному расходованию энергии силового агрегата.
2. Количественные значения амплитудно-фазовых частот колебаний привода добывающего комплекса  $A_{др}$  при изменении давления  $p$  в поршневой полости привода от вертикальной нагрузки масс рабочего оборудования подтвердила предположение об отсутствии необходимости тратить постоянную мощность привода в каждом такте добычи. Основными энергоёмкими процессами являются разгон рабочего оборудования (ускорение сопряжений плунжера) и торможение (замедление элементов). Именно на этом коротком интервале времени –  $t_1$  и  $t_3$  – требуется высокая мощность привода. Процесс установившегося движения элементов рабочего оборудования является основным  $t_2$  и менее энергоёмким, что подтверждает целесообразность и эффективность предложенного гибридного меха-

низма для перераспределения мощности в соответствии с энергоемкостью процесса.

3. Применение гибридного гидроцилиндра решает научно-техническую задачу по эффективным методам снижения энергоемкости процесса и перераспределения мощности в соответствии с энергоемкостью операций нагнетания нефтяной жидкости в подъемный лифт штанговых глубинных насосов. Разработана и доказана перспектива новой научной идеи о необходимости перераспределения мощности привода и силовой установки по исполнительным элементам за счет гибридизации привода станков-качалок. Установленные зависимости изменения эффективной области работы, выполняемой электрогидроцилиндром эффективного действия  $A_{эф}$ , от расходуемой мощности  $N_p$  и потребляемой мощности силовой установки  $N_{ev}$  расширяют границы применимости полученных результатов в любой отрасли машиностроения в соответствии с энергоемкостью операции. Подробно изложена теория рекуперации энергии при взаимодействии двух разнород-

ных сред, вносящая вклад в расширение представлений о критериях энергоэффективности и концепции исследования мощностных характеристик и энергоемкости привода станка-качалки на нефтегазодобывающих малодобитных скважинах.

Практическая перспектива использования результатов исследований и применимость электрогидроцилиндров заключается в необходимости контролировать положение и динамику оборудования, сохраняя оптимальные тяговые мощности и высокие силовые характеристики. Удаленность насосных комплексов от баз и ремонтных постов повышает актуальность применения гибридных приводов, реализующих самодиагностику на удаленном доступе.

Основные результаты исследований получены в рамках реализации гранта МОН РК № AP08856129 по направлению «Разработка и внедрение новой энергоэффективной технологии изготовления высокопроизводительного глубинно-насосного комплекса добычи углеводородов на малодобитных нефтегазовых скважинах с рекуперативным приводом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон РФ от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», редакция от 13.07.2015.
2. Поплыгин В.В., Уирсигроч М. Исследование эффективности комплексного нестационарного воздействия на залежь с высоковязкой нефтью // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 7–12.
3. Лахов Ю.А. Определение показателей энергоэффективности нефтеперерабатывающих предприятий // ScienceTime. Серия: Технические науки. – 2014. – № 7. – С. 198–207.
4. Балансирный привод штанговой насосной установки: пат. Респ. Казахстан, № 26175, заявл. 11.11.2011; опубл. 14.09.2012. F04B 47/02. Бюл. № 9. – 5 с.
5. Study on the optimal phase structure of recovered steam turbine blades using different technological spray modes for deposition of  $Al_2O_3$  / V.V. Savinkin, T.Yu. Ratushnaya, A.A. Ivanishev, A.R. Surleva, O.V. Ivanova, S.N. Kolisnichenko // AIP Conference Proceedings 2019. – 2019. – 020022
6. Zhang W.W., Cong S. Process optimization and performance evaluation on laser beam welding of austenitic/martensitic dissimilar materials // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – V. 92. – № 9. – P. 4161–4168.
7. Метод интегрированной оценки усталостных напряжений в структуре восстановленных лопаток ТЭЦ и ГЭС / В.В. Савинкин, В.Н. Кузнецова, Т.Ю. Ратушная, Л.А. Киселев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 8. – С. 65–77.
8. Карпович С.Е. Мехатронные системы параллельной кинематики на гибридных приводах прямого действия // Доклады Белорусского Государственного Университета информатики и радиоэлектроники. – 2019. – № 2 (120). – С. 59–72.
9. Исаев Ю.М. Расчетно-экспериментальное исследование многомашинного электрогидравлического следающего привода // Научно-технические ведомости СПбПУ. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 136–143.
10. Study on the influence of injection/production type and well pattern and spacing on producing degree of thin and poor layers / S. Liang, Y. Liu, N. Zhang, B. Zeng // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2018. – V. 8. – Iss. 3. – P. 861–870.
11. Велиев Э.М. Исследование зависимости эффективности технологии нестационарного заводнения от продолжительности полупериода работы/простоя нагнетательных скважин в цикле при разработке высокопродуктивных неоднородных коллекторов маловязкой нефти // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 2 (100). – С. 46–56.
12. Khakimyanov M.I. Increasing the energy efficiency of downhole pump of artificial lift // Energetik. – 2016. – № 5. – P. 36–38.
13. Semisynov R.A., Kiselev Y.S., Khakimyanov M.I. Analysis of energy losses in the technological elements of well oil extracting pump units // Oil and Gas Business: electronic scientific journal. – 2015. – № 6. – P. 179–198.
14. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R. Energy efficient asynchronous motors, their technical and economic advantages and cost optimization of their development // Electrotechnical systems and complexes. – 2016. – № 2 (31). – P. 30–34.
15. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Technological parameters influence of oil wells on energy consumption of sucker rod pumps // Oil and Gas Business: electronic scientific journal. – 2015. – № 1. – P. 533–563.
16. Энергоэффективный электрогидроцилиндр рекуперативного действия: пат. Рос. Федерация, № 2015137576/06, заявл. 02.09.2015; опубл. 27.11.2016. Бюл. № 33. – 2 с.
17. Однокопьев Г.И., Букреев В.Г., Розаев И.А. Исследование отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 303. – № 10. – С. 69–81.
18. Результаты опытно-промышленных испытаний перспективных приводов штанговых скважинных насосных установок / И.И. Мазеин, А.Н. Устинов, М.В. Тягтев, А.А. Рыбин, Д.И. Шишляников, М.М. Тягтев // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 9. – С. 8–14.
19. Савинкин В.В. Развитие теории энергоэффективности одноковшовых экскаваторов: дис. ... д-ра техн. наук. – Омск, 2016. – 390 с.
20. Burkov P.V., Burkova S.P., Timofeev V.Y. Justifying a method of balancing crank-and-rod mechanism of mining roadheader // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 682. – P. 270–275.
21. Lovlin S.Y., Abdullin A.A. Adaptive system for compensation of periodic disturbances in servo drive // 2016 IX Intern. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, 2016. – P. 1–5.
22. Расчетно-экспериментальное исследование многомашинного электрогидравлического следающего привода / Ю.М. Исаев, А.В. Матросов, М.А. Машков, Р.А. Сунарчин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 136–143.
23. Скосарева Е.С., Колобин С.А. Управление движением мехатронной системы с гибким вращательным звеном: теория и эксперимент // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – № 5. – С. 780–786.

24. Журавлев В.Ф. Закономерности трения при комбинации скольжения и верчения // Известия Академии Наук. Механика твердого тела. – 2003. – № 4. – С. 81–88.
25. Шапарев А.В., Галямов А.А. Особенности изнашивания механизмов машин в зазоре пары трения // Молодой ученый. – 2015. – № 12 (92). – С. 94–97.

Поступила: 20.04.2020 г.

#### **Информация об авторах**

**Савинкин В.В.**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспорта и машиностроения, Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева.

**Санду А.В.**, доктор PhD, Факультет материаловедения и инжиниринга, Технический университет имени Георге Асачи.

**Ратушина Т.Ю.**, магистр, докторант кафедры транспорта и машиностроения, Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева.

**Визуриане П.**, кандидат технических наук, Факультет материаловедения и инжиниринга, Технический университет имени Георге Асачи.

**Колисниченко С.В.**, магистр, докторант кафедры транспорта и машиностроения, Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева.

**Омаров М.Ш.**, начальник технологического отдела ТОО «Завод многопрофильного оборудования».

UDC 629.5:62.2 622.276.53.054.2

## STUDY OF REDISTRIBUTION OF THE OIL COMPLEX POWER DRIVE EFFECTIVENESS FOR MARGINAL WELLS WHEN INSTALLING CONSTRUCTION OF RECUPERATIVE ACTION ELECTRO HYDRO CYLINDER

**Vitaliy V. Savinkin<sup>1</sup>,**  
cavinkin7@mail.ru

**Andrey V. Sandu<sup>2</sup>,**  
sav@tuiasi.ro

**Tatyana Yu. Ratushnaya<sup>1</sup>,**  
tratushnaia@mail.ru

**Petrica Vizureanu<sup>2</sup>,**  
peviz2002@yahoo.com

**Svetlana V. Kolisnichenko<sup>1</sup>,**  
svetlana\_ko-ko@mail.ru

**Malik Sh. Omarov<sup>3</sup>,**  
omarov\_malik@mail.ru

<sup>1</sup> North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev,  
86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan.

<sup>2</sup> Gheorghe Asachi Technical University of Iasi,  
41, D. Mangeron street, Iasi, 700050, Romania.

<sup>3</sup> LLP «Multi-purpose equipment factory»,  
22, Ya. Gashek street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop a scientifically-based design and technological system for efficient power redistribution across the executive elements of high-loaded equipment in accordance with the energy intensity of extracting hydrocarbons. The relevance is confirmed by the lack of domestic technologies for development of hybrid recuperative drives used for energy production and conversion, based on the study of synergetic connections of pumping complexes of marginal wells, as the main indicator of energy efficiency.

**The main aim** is to improve energy efficiency and resource life of high-loaded oil-producing pumping complexes of marginal wells by installation of a developed hybrid drive with an electro hydro cylinder of recuperative action, which provides power redistribution by executive elements.

**The object** of the research is a hybrid drive system of the mining «pumping unit» with an energy-efficient electric hydro cylinder of recuperative action.

**The complex research method** was used to study the interaction of two physically and technically dissimilar media (hydraulics and electromagnetic fields) in the structure of loaded parts of a hybrid drive. The cyclic process of dynamic loading of the working equipment of the pumping complex is studied by the methods of kinematic analysis and force calculation. We used the methodology of system analysis, as well as the method of redistribution of moments of inertia forces and power balance of the power drive. The mathematical apparatus was effectively applied to determine the dependencies of changes in power characteristics on operational indicators and dynamic loads of the pumping complex. The method of critical analysis allowed us to set priorities for the development of geometric parameters, and the use of the laws of mechanics allowed us to justify the structural elements of kinematics that require improvement. The tools of the finite element method and computer systems allowed us to study the performance of the hybrid drive, analyze and process the results obtained.

**Results.** The authors have designed the hybrid electro hydro cylinder of recuperative operation, providing efficient conversion of mechanical and hydraulic energy to electric hydraulic drive under the influence of gravity of oil pump for low-yield complex wells. The developed design significantly increases the energy efficiency of the power plant and drive of the oil production complex, ensuring hybrid drive power redistribution in accordance with the energy intensity of operations. The scientific problem of an effective way to redistribute power across the elements of oil-producing complexes in accordance with the energy intensity of the operation performed and the conversion of the energy of its own mass of gravity of the working equipment is solved. The authors developed and proved the theory of power and power parameters of a ground-based mining pumping complex based on the implementation of the principles of energy recovery and power redistribution in the performance of work processes, which provided new results in the study of energy intensity.

### Key words:

Oil production complex, electro hydro cylinder, recovery, energy intensity, power redistribution system.

### REFERENCES

1. FZ № 261 *Federalnyy zakon RF ot 23 noyabrya 2009 goda № 261-FZ «Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy*

*effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii»* [Federal law of the Russian Federation no. 261-FZ of November 23, 2009 «On energy saving and energy effi-

- ciency improvement and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation»]. Moscow, Kreml Publ., 2009. 103 p.
2. Poplygin V.V., Uirsig M. Study of the effectiveness of complex non-stationary impact on a deposit with high-viscosity oil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 7–12. In Rus.
  3. Lachov Yu.A. Determination of energy efficiency indicators for oil refineries. *ScienceTime. Seriya: Technical Sciences*, 2014, no. 7, pp. 198–207. In Rus.
  4. Myrzakhmetov B.A., Latypov A.S., Shagimardanov J.G. *Balansirnyy privod shtangovoy nasosnoy ustanovki* [Balancing drive of the rod pumping unit]. Patent RK, no. 26175, 2012.
  5. Savinkin V.V., Ratushnaya T.Yu., Ivanischev A.A., Surleva A.R., Ivanova O.V., Kolisnichenko S.N. Study on the optimal phase structure of recovered steam turbine blades using different technological spray modes for deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 020022.
  6. Zhang W.W., Cong S. Process optimization and performance evaluation on laser beam welding of austenitic/martensitic dissimilar materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 92, no. 9, pp. 4161–4168.
  7. Savinkin V.V., Kuznetsova V.N., Ratushnaya T.Yu., Kiselev L.A. Method of integrated assessment of fatigue stresses in the structure of the restored blades of CHP and HPS. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, pp. 65–77. In Rus.
  8. Karpovich S.E., Dainiak I.V., Kuzniatsou V.V. Mechatronic system of parallel kinematics on hybrid direct action drivers. *Doklady BGUIR*, 2019, no. 2, pp. 59–72. In Rus.
  9. Isaev Yu.M. Computational and experimental study of a multi-machine electrohydraulic tracking drive. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 136–143. In Rus.
  10. Liang S., Liu Y., Zhang N., Zeng B. Study on the influence of injection/production type and well pattern and spacing on producing degree of thin and poor layers. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, vol. 8, Iss. 3, pp. 861–870.
  11. Veliev E.M. Efficiency of non-stationary flooding as a function of injection wells idle time for the highly productive light oil reservoirs. *Scientific and technical journal «Problems of collecting, preparing and transporting oil and petroleum products»*, 2015, no. 2 (100), pp. 46–56. In Rus.
  12. Khakimyanov M.I. Increasing the energy efficiency of downhole pump of artificial lift. *Energetik*, 2016, no. 5, pp. 36–38.
  13. Semisynov R.A., Kiselev Y.S., Khakimyanov M.I. Analysis of energy losses in the technological elements of well oil extracting pump units. *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*, 2015, no. 6, pp. 179–198.
  14. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R. Energy efficient asynchronous motors, their technical and economic advantages and cost optimization of their development. *Electrotechnical systems and complex*, 2016, no. 2 (31), pp. 30–34.
  15. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Technological parameters influence of oil wells on energy consumption of sucker rod pumps. *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*, 2015, no. 1, pp. 533–563.
  16. Savinkin V.V., Kuznetsova V.N. *Energoeffektivnyy elektrodrotsilindr rekuprativnogo deystviya* [Energy-efficient electro hydraulic cylinder of recuperative action]. Patent PF, no. 2015137576/06, 2016.
  17. Odnokopylov G.I., Bukreev V.G., Rozaev I.A. Research of fault-tolerant switched-reluctance motor of electrical oil pump. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 303, no. 10, pp. 69–81. In Rus.
  18. Mazein I.I., Ustinov A.N., Diaghilev M.V., Rybin A.A., Shishlyannikov D.I., Diaghilev M.M. Results of pilot-industrial tests of perspective drives of sucker-rod pumping unit. *Mining equipment and electrical engineering*, 2016, no. 9, pp. 8–14. In Rus.
  19. Savinkin V.V. *Razvitie teorii energoeffektivnosti odnokovshovykh ekskavatorov*. Dis. Dokt. nauk [Development of the theory of energy efficiency of single-bucket excavators. Dr. Diss.]. Omsk, 2016. 390 p.
  20. Burkov P.V., Burkova S.P., Timofeev V.Y. Justifying a method of balancing crank-and-rod mechanism of mining roadheader. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 270–275.
  21. Lovlin S.Y., Abdullin A.A. Adaptive system for compensation of periodic disturbances in servo drive. *IX Intern. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS)*. Perm, 2016. pp. 1–5.
  22. Isaev Yu.M., Matrosov A.V., Mashkov M.A., Okhotny R.A. Computational and experimental study of a multi-machine electrohydraulic tracking drive. *SPbPU Journal of Engineering Science and Technology*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 136–143. In Rus.
  23. Skosareva E.S., Kolubin S.A. Controlling the movement of a mechatronic system with a flexible rotational link: theory and experiment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 780–786. In Rus.
  24. Zhuravlev V.F. Regularities of friction in the combination of sliding and twisting. *Mechanics of Solids*, 2003, no. 4, pp. 81–88. In Rus.
  25. Shaparev A.V., Galyamov A.A. Features of wear of machine mechanisms in the gap of a friction pair. *Molodoy ucheny*, 2015, no. 12 (92), pp. 94–97. In Rus.

Received: 20 April 2020.

#### Information about the authors

**Vitaliy V. Savinkin**, Dr. Sc., associate professor, head of the department, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev.

**Andrey V. Sandu**, PhD, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi.

**Tatyana Yu. Ratushnaya**, postgraduate student, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev.

**Vizureanu Petrica**, Cand. Sc., associate professor, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi.

**Svetlana V. Kolisnichenko**, postgraduate student, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev.

**Malik Sh. Omarov**, head of technology department, LLP «Multi-purpose equipment factory».

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 26.02.2021. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 28,49. Уч.-изд. л. 25,77.  
Заказ 30-21. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY



ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ