



**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Том 333, № 9, 2022**

**Издается с 1903 г.**

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

**Volume 333, № 9, 2022**

**Published since 1903**



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

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

ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Том 333, № 9, 2022

Издательство  
Томского политехнического университета  
2022

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Остwald P.B., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старostenko B.I., 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)  
Уленеков О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Алексеенко С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)  
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)  
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)  
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)  
Антиленко 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)  
Зюзев 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)  
Кирьянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)  
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)  
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2022

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on\_line) – 2413-1830

«Известия Томского политехнического университета. Инженеринг 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. Инженеринг георесурсов»:

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



**TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY**

---

ISSN (print) – 2500\_1019  
ISSN (on\_line) – 2413\_1830

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

Volume 333, № 9, 2022

Tomsk Polytechnic University Publishing House  
2022

## 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)  
Belozerov V.B., Dr. Sc. (Russia)  
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., PhD (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
Alekseenko 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)  
Arbusov S.I., Dr. Sc. (Russia)  
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)  
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)  
Ludmila A. Stroksa, Dr. Sc. (Russia)  
Alexey K. Mazurov, Dr. Sc. (Russia)  
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)  
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

## AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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 Geoeology 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

К проблеме установления продолжительности бурения скважин в условиях отсутствия вращения бурильной колонны	7	On the issue of establishing the duration of well drilling without the drill string rotation
Харламов С.Н., Джанхорбани М., Брыксин М.Р.		Kharlamov S.N., Janhorbani M., Bryksin M.R.
Эжектирование возвратного потока воздуха для увеличения дальности направленной в тупик воздушной струи	27	Ejecting the return air flow on increasing the range of the air jet directed into the face of the dead-end drift
Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л.		Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L.
Методические аспекты расчёта достоверного объема шламовой пробы на примере месторождения россыпного золота ручья Балаганах (Республика Саха (Якутия))	37	Methodological aspects of calculating the reliable volume of a sludge sample on the example of a placer gold deposit in the Balagannakh stream (Republic of Sakha (Yakutia))
Собянин И.Ю., Гаврилов Р.Ю., Собянин Ю.П.		Sobyanin I.Yu., Gavrilov R.Yu., Sobyanin Yu.P.
Первые данные о распределении изотопов, макро- и микроэлементов из атмосферных выпадений в лишайниках арктических территорий Западной Сибири	46	Distribution of isotopes, macro- and microelements from atmospheric fallout in lichens of Arctic zone of Western Siberia – first data
Кропачева М.Ю., Восель Ю.С., Мезина К.А., Белянин Д.К., Мельгунов М.С., Макарова И.В.		Kropacheva M.Yu., Vosel Yu.S., Mezina K.A., Belyanin D.K., Melgunov M.S., Makarova I.V.
Система пароснабжения нефтеперерабатывающего предприятия как объект управления	57	Steam supply system of an oil refinery as a control object
Матвеев В.Г., Краснянский М.Н., Дмитриевский Б.С., Васильевский К.С.		Matveykin V.G., Krasnyansky M.N., Dmitrievsky B.S., Vasilevskiy K.S.
Полимодальность гистограмм геологических характеристик как критерий флюидодинамики	66	Polymodality of histograms of geological characteristics as a criterion of fluid dynamics
Мельник И.А.		Melnik I.A.
Континентальные железняки Киреевского проявления (Обь-Тымская низменность): минералогия и геохимия	75	Continental ironstones of the Kireevsk occurrence (Ob-Tym depression): mineral formation and geochemistry
Даuletова А.Б., Рудмин М.А.		Dauletova A.B., Rudmin M.A.
Роль опасных геологических процессов при эксплуатации нефтепровода «Чаянда-ВСТО»	86	Role of hazardous geological processes in operation of the Chayanda-ESPO oil pipeline
Строкова Л.А., Нечаев Д.А.		Strokskaya L.A., Nechaev D.A.
Равновесно-неравновесное состояние природных вод территории тюрийских озер (восточное Забайкалье) с ведущими минералами вмещающих пород	99	Equilibrium-nonequilibrium state of natural waters in the area of Torey lakes (Eastern Transbaikalia) with leading minerals of host rocks
Дребот В.В., Лепокурова О.Е.		Drebota V.V., Lepokurova O.E.
Оценка содержания химических элементов в компонентах природной среды «восточного» следа радиоактивных выпадений семипалатинского испытательного полигона	113	Assessment of chemical element content in the natural environment components of the «Vostochny» trace of the radioactive fallout at the Semipalatinsk test site
Темиржанова А.Е., Язиков Е.Г., Мухамедиляров Н.Ж., Салыменбаев С.Е., Умаров М.А., Есильканов Г.М., Ташекова А.Ж.		Temirzhanova A.Y., Yazikov E.G., Mukhamediyarov N.Zh., Salmenbaev S.E., Umarov M.A., Yesilkanov G.M., Tasheko A.Zh.
Состав смолисто-асфальтеновых и масляных компонентов тяжелых нефтей	128	Composition of resin-asphaltene and oil components of heavy oils
Герасимова Н.Н., Чешкова Т.В., Коваленко Е.Ю., Сагаченко Т.А., Мин Р.С., Огородников В.Д.		Gerasimova N.N., Cheskova T.V., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A., Min R.S., Ogorodnikov V.D.
Методика подбора режима разработки нефтегазоконденсатной залежи с помощью гидродинамического моделирования	137	Methodology for selecting the mode of development of oil and gas condensate deposit using hydrodynamic simulation
Кряжев В.А., Кряжев Я.А., Гильманов А.Я., Шевелев А.П.		Kriazhev V.A., Kriazhev Ya.A., Gilmanov A.Ya., Shevel A.P.
Влияние деформаций терригенного коллектора в процессе снижения забойного и пластового давления на изменение проницаемости и продуктивности скважины	148	Influence of sandstone reservoir deformations during bottomhole and reservoir pressure decreasing on the permeability and well productivity changes
Попов С.Н., Чернышов С.Е., Гладких Е.А.		Popov S.N., Chernyshov S.E., Gladkikh E.A.
Факторная модель динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН и правила её сопровождения	158	Estimation of ESP operational resource dynamics using factor-based model
Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Константинов И.В.		Solov'yev I.G., Govorkov D.A., Konstantinov I.V.

<b>Напряженно-деформированное состояние трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов</b> Файзуллина Э.В., Паршикова М.А., Гулин Д.А., Султанмагомедов Т.С., Султанмагомедов С.М., Насибуллин Т.Р.	168	<b>Stress-strain state of a pipeline buried in areas of distribution of heavy soils</b> Fayzullina E.V., Parshikova M.A., Gulin D.A., Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M., Nasibullin T.R.
<b>Анализ условий устойчивости бортов железорудных карьеров, сложенных осадочными породами</b> Ефремов Е.Ю., Обогрелова П.И.	178	<b>Slope stability analysis for open pit sides composed of sedimentary rocks</b> Efremov E.Yu., Obogrelova P.I.
<b>Оценка запаса древостоев на землях лесного фонда с учетом антропогенных рисков: программно-методическое обеспечение</b> Лепихина О.Ю., Демидова П.М., Колесник О.А., Ковязин В.Ф., Гурьева О.С., Басова Л.А.	185	<b>Assessment of the growing stock of forest fund lands taking into account anthropogenic risks: software and methodological support</b> Lepikhina O.Yu., Demidova P.M., Kolesnik O.A., Kovayzin V.F., Gureva O.S., Basova L.A.
<b>Простая методология для долгосрочного прогнозирования качества зерна</b> Кирста Ю.Б., Пузанов А.В., Рождественская Т.А.	198	<b>Simple methodology for long-term prediction of grain quality</b> Kirsta Yu.B., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A.
<b>Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор)</b> Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуйков А.В.	209	<b>Current state of using cavitation technologies (brief overview)</b> Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., Zhuikov A.V.
<b>Минерально-вещественный состав твердого осадка снегового покрова в различных функциональных зонах г. Усолье-Сибирское</b> Холодова М.С., Пастухов М.В., Бычинский В.А., Просекин С.Н., Белозерова О.Ю.	219	<b>Mineral and material composition of solid sediment of snow cover in various functional zones of Usolye-Sibirskoe</b> Kholodova M.S., Pastukhov M.V., Bychinsky V.A., Prosekin S.N., Belozerova O.Yu.

УДК 504.61:532.542: 536.252

## К ПРОБЛЕМЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ВРАЩЕНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ

Харламов Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
kharsn@mail.ru

Джанхорбани Мехран<sup>1</sup>,  
mehran.janghorbani@gmail.com

Брыксин Максим Радиславович<sup>2</sup>,  
Maxbryksin@mail.ru

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

<sup>2</sup> Филиал общества с ограниченной ответственностью «Газпром инвест Томск»,  
Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 39.

**Актуальность** исследования определяется необходимостью детального моделирования эволюции динамической структуры вязкой смеси, изменений объемной концентрации пробуренного шлама в кольцевом межтрубном пространстве скважины, которая постоянно накапливается в процессе бурения, а также контроля ее критических значений, приводящих к проблемам функционирования специального оборудования.

**Цель** работы состоит в численном моделировании в рамках методов вычислительной гидродинамики (*computational fluid dynamics – CFD*) развивающегося по времени и пространству процесса накопления шлама во внутренних системах с эксцентричным неподвижным ядром (трубах, каналах) при различных условиях течения буровых растворов типа Гершеля–Балкли, отличающихся произвольным изменением их реологических свойств, уяснении особенностей процесса накопления шлама, а также определении интенсивности засорения и момента времени для очистки скважин.

**Методы** исследования рассматриваемых процессов основаны на комплексном подходе к физико-математическому и компьютерному моделированию гидродинамики и конвективного массопереноса в гетерогенных неоднородных сплошных средах, осложненных реологическими неильтоновскими эффектами, и комбинированном прямом и опосредованном анализе возможностей построенной модели к прогнозу сути процессов очистки и бурения скважин путем сопоставления результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными.

**Результаты** демонстрируют особенности влияния реологических параметров на скорость накопления шлама в кольцевом межтрубном пространстве и закономерности выноса/осаждения частиц пробуренной породы при изменении режимов течения смеси. Оценены возможности метода исследования гидротранспорта в рамках ПО ANSYS ЭЛ – подхода посредством CFD-DEM модели при прогнозе перепада поля давления в скважине, эволюции динамической структуры смеси в зависимости от интенсивности загромождения межтрубного пространства шламом, изменений среднемассовой скорости на входе в скважину в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Численно определены и рекомендованы в практику условия для расчета максимальной рекомендуемой продолжительности бурения при произвольных комбинациях значений технологических и реологических параметров бурового раствора.

### Ключевые слова:

Скважина, горизонтальные участок, кольцевые потоки, реология, бурение, жидкость Гершеля–Балкли, моделирование, гидродинамика, массоперенос, транспорт, очистка.

### Введение

При бурении наклонно-направленных скважин не всегда возможны режимы вращения бурильной колонны. Известно, что при сложных траекториях ствола скважины, включающих короткие криволинейные изгибы, при бурении боковых стволов и протяженных горизонтальных участков вращение бурильной колонны ведёт к возникновению значительных изгибающих сил в ее элементах. Все это приводит к негативным последствиям функционирования и целостности дорогостоящего технологического оборудования. С другой стороны, следует учитывать, что в наклонных участках скважины всегда присутствует эксцентричность ( $e$ ) бурильной колонны относительно продольной оси скважины. И особенно в случаях, когда  $e > 60\%$ , а также при ламинарном течении бурового раствора со свойствами жидкости типа Гершеля–

Балкли (ГБ), полная очистка кольцевого пространства от частиц пробуренных пород на базе неильтоновских жидкостей только гидравлическим способом невозможна. Следовательно, для недопущения формирования условий чрезвычайного роста объемной доли шлама в кольцевом пространстве после бурения определенного участка скважины персоналу придётся прекращать бурение и проводить ее механическую очистку (шаблонировку). Время, потраченное на шаблонировку, хотя и необходимо, но все же нежелательно в экономическом смысле. Поэтому сокращение частоты таких операций имеет высокое значение с экономической точки зрения. Стоит отметить, что чрезмерное уменьшение числа таких шаблонировок, конечно, ведёт к ряду серьёзных технических проблем, связанных с ростом концентрации частиц в кольцевом пространстве. Это могут быть, например,

процессы увеличения перепада давления, которые негативно воздействуют на продуктивный пласт или прихват бурильной колонны. В силу сказанного, оптимизация периодичности и частоты механической очистки имеет ключевое значение для экономичности и эффективности бурения любой скважины. Особенно при бурении горизонтальных участков, где эксцентричность достигает своих максимальных значений и гидравлическая очистка является самой проблематичной. В настоящее время изучение особенностей гидродинамики ламинарного течения смеси неньютоновской жидкости с частицами твёрдой фазы через эксцентричное кольцевое пространство между двумя горизонтальными трубами и установление закономерностей такого течения цепны для уяснения механизмов, сопровождающих реальный процесс бурения в рамках ряда физических допущений к численной модели рассматриваемой проблемы транспорта шлама и очистки скважин с горизонтальным участком. Основу исследования составляют следующие задачи:

- установление особенностей процесса накопления шлама при пространственном изменении реологических свойств жидкостей типа ГБ;
- оценка влияния малых значений концентраций шлама на перепад поля давления с целью уяснения факта: могут ли значения перепада давления служить критерием прогноза критической загруженности скважины шламом;
- предложение метода в качестве инженерной методики для оптимизации продолжительности бурения/периодичности очистки при произвольных комбинациях технических и реологических параметров технологического процесса бурения.

#### Отдельные библиографические сведения по проблеме

Вопрос об эффективности очистки скважин впервые был рассмотрен Р. Пигготтом в 1941 г. в [1], где он пытался найти скорость скольжения твёрдых частиц в жидкостях типа Бингама при ламинарном ( $Re < 0,05$ , посредством закона Стокса) и турбулентном ( $Re > 2000$ , посредством закона Риттингера) течениях. В дальнейшем это исследование было продолжено другими авторами, такими как К. Виллиамс и Г. Брюс [2], И. Хопкин [3], У. Цейдлер [4], Т. Цифферман с соавт. [5] и Р. Томас с соавт. [6]. Все эти экспериментальные работы были сфокусированы на жидкостях типа Бингама, т. е. глинистых растворах, которые представляли собой основной тип растворов при бурении неглубоких вертикальных скважин. В работе С. Окраджни и Дж. Азара [7] впервые рассмотрен процесс гидротранспорта в наклонно-направленных скважинах (ННС). Указанные авторы установили существование трех различных зон в ННС по механизму гидротранспорта: 1 случай соответствует углам наклона от вертикали до  $45^\circ$ . Для этих условий показано, что здесь эффективнее всего ламинарное течение и важно увеличивать отношение динамического напряжения сдвига (ДНС)/пластическая вязкость; 2 случай соответствует условиям наклона участков скважины от вертикали в диапазоне от  $45^\circ$  до  $55^\circ$ . В таких конфигурациях может быть эффективным как ламинарное,

так и турбулентное течение и данная зона является самой проблематичной с точки зрения очистки; 3 случай характерен для скважин с углами наклона от вертикали в диапазоне от  $55^\circ$  до  $90^\circ$ . Здесь для гидротранспорта эффективен турбулентный режим течения, но изменения реологических свойств раствора не играют большой роли. Подобные исследования, в которых рассматривалось влияние различных параметров, например размера частиц и скорости вращения бурильной колонны, на процесс гидротранспорта, были проведены также М. Мартином с соавт. [8] во Франции, Дж. Фордом с соавт. [9] и Дж. Педеном с соавт. [10] в Великобритании. Работу Т. Беккер с соавт. [11] можно считать ключевой, так как их выводы до сих пор часто рассматриваются как определяющие правила очистки скважин. А. Мартинс с соавт. [12] в своей работе показали, что при горизонтальном бурении с эксцентричностью скважины полная очистка скважины невозможна. Результаты М. Дуан с соавт. [13] указывают на физическую особенность процесса. Установлено, что количество частиц в кольцевом пространстве стабилизируется только после достаточно длительного времени, даже в случае с вращением. Причем требуется порядка 30–60 циклов расчета течения, чтобы стабилизировать количество шлама в канале и процесс достиг условий установившегося состояния. Наряду с экспериментальными исследованиями начиная с конца 1980-х появились работы, основанные на механическом анализе сил, действующих на частицы, и законах сохранения массы и импульса между разными слоями течения. Такие исследования ставили цель ответить на следующие вопросы.

1. Какой должна быть скорость течения для определённой конфигурации геометрического пространства скважины, меньше значения которой начинает формироваться слой осаждаемых частиц?

2. Какой будет конечная толщина данного слоя?

Первый известной работой по этой теме было исследование, опубликованное А. Гавинье и Дж. Собей [14]. В нем предлагается, что геометрия течения состоит из двух частей: в нижней лежит неподвижный слой частиц (хотя через его поры раствор может течь), в верхней части раствор течет свободно. Позднее модель, представленная в [14], была доработана Д. Нгуен и С. Рахман [15], которые на основании экспериментов заметили, что при различных условиях течения в кольцевом пространстве могут существовать разные режимы течения и транспорта частиц. Первый результат из [15] сводится к тому, что при низких скоростях течения внизу существует неподвижный слой частиц (1 слой) с постоянной концентрацией. Над этим слоем образуется подвижный дисперсный слой (2 слой) из состава частиц и раствора. Здесь концентрация частиц меняется по вертикальной оси. И, наконец, 3 слой сверху – зона свободного течения раствора, в котором нет частиц твёрдой фазы. Второй результат [15] показывает, что при стремлении скорости течения к турбулентному режиму частицы перемещаются из среднего слоя в верхний и там образуется зона турбулентной суспензии. При этом первый и второй слои все ещё существуют (имеется три специ-

фических слоя). Третий результат [15] показывает, что если наблюдается дальнейшее увеличение скорости течения раствора, то нижний слой постоянно разрушается (вследствие динамической деструкции) и наконец исчезает. Тогда остается только дисперсный слой внизу и зона турбулентной суспензии наверху (имеется только два специфических слоя). Четвертый результат [15] сводится к тому, что при достаточно больших скоростях второй слой также может исчезнуть. Тогда везде формируются условия для течения турбулентной суспензии (смеси твердых частиц и раствора) (один специфический слой). На основании полученных результатов была разработана первая компьютерная модель, представленная Л. Зо с соавт. [16], которая позволила уяснить суть эффектов, определяющих течение смеси и слоя осевших частиц, а также характер влияния изменений разных параметров гидродинамического процесса транспорта смеси на толщину отложений. В дальнейшем К. Сузана с соавт. [17] разработали модель, по которой проведено моделирование неустановившегося течения смеси по всей длине горизонтальной скважины (1200 м) и были получены данные о пространственном изменении толщины слоя. Заметим, что в зоне свободного течения при перепаде давления по длине скважины в исследовании [17] концентрация шлама всегда была порядка 52 %. Ряд других авторов, таких как, например, Х. Чо с соавт. [18] и И. Озбауглу с соавт. [19], разработали свои оригинальные модели. В итоге сравнение с имеющимися экспериментальными результатами показало, что их модели способны предсказать изменения толщины слоя шлама с погрешностью меньше 15 % и перепад давления с погрешностью меньше 20 % при концентричном положении буровых труб. Но в случае с эксцентричностью скважины модель сильно недооценивает влияние эксцентричности на толщину слоя частиц, хотя эксперименты указывали на значительное влияние на процесс изменений эксцентричности трубы. Стоит отметить, что все указанные модели до сих пор используются в профессиональных ПО при ряде физических допущений, что влияет на точность результатов, особенно при значительных значениях эксцентричности труб. Из представленных результатов видно, что повышение точности расчета процессов очистки связано с необходимостью решения следующих задач:

- выяснения механизмов влияния на структуру течения смеси межтрубного пространства, установления особенностей и закономерностей транспорта частиц шлама в реальных условиях бурения, приводящих к изменению толщины отложений по длине трубы;
- учета специфического характера действия внешних и внутренних сил, формирующих поле скорости раствора и частиц в скважине.

Прогресс в полномасштабном вычислительном моделировании процессов очистки связывают с работой Х. Билгесу [20]. С этого момента детальное численное моделирование стало предпочтительным направлением изучения процесса гидротранспорта. Первые вычислительные работы, например Н. Мишра

[21], С. Хан с соавт. [22], У. Мме с соавт. [23], Х. Джу с соавт. [24], Я. Демиралп [25], Т. Офей с соавт. [26], М. Камяб и В. Расули [27], Е. Эпеллэ и Д. Герогиоргис [28], были посвящены определению погрешности данного подхода. В них авторы моделировали течения смеси различных ньютоновских и неニュтоновских жидкостей с частицами твёрдой фазы в турбулентном и ламинарном режимах с применением эйлерово-эйлерова (ЭЭ) (где обе фазы рассматриваются как сплошная среда) и эйлерово-лагранжева (ЭЛ) (где капельная фаза рассматривается как сплошная среда и частицы твёрдой фазы рассматриваются дискретно) подходов и пришли к выводу, что результаты обоих подходов в качественном отношении весьма схожи и отличаются от имеющихся экспериментальных данных на величину порядка 11 % (по расчёту скоростей фаз в коаксиальном и радиальном направлениях). При этом указанные авторы заметили, что ЭЛ подход становится трудоемким с увеличением числа частиц (выше 10–12 % по концентрации), т. е. когда в процессе расчета необходимо вычислять не только траектории каждой частицы, но и учитывать столкновения между ними. Поэтому можно предположить, что до 10 %-ой концентрации частиц ЭЛ подход представляется более подходящим для моделирования. Но после этого предела ЭЭ подход становится предпочтительным. Отметим, что так как по критерию Пиготта в расчетах принимают максимальную концентрацию шлама в кольцевом пространстве равной 5 %, то в данной работе моделирование течения смеси выполнено в рамках ЭЛ подхода. Анализ имеющихся публикаций [1–28] позволяет утверждать, что до 2017 г. достоверность результатов моделирования процессов транспорта и очистки в рамках методов вычислительной гидродинамики (ВГ) была достаточно хорошо доказана, чтобы рекомендовать их к решению задачи гидротранспорта. В частности, разные авторы, например О. Хейдари и соавт. [29], С. Саиндла и соавт. [30], изучили влияние эксцентричности, Е. Эпелле с соавт. [31, 32], Б. Шао с соавт. [33], Ш. Гулраиз и К. Грей [34] рассматривали влияние размера и сферичности частиц, Б. Панг с соавт. [35], А. Буш с С. Йохансен [36] рассматривали влияние орбитально-го вращения внутренней трубы, М. Хук с соавт. [37] и М. Надери и Е. Хамечи [38] применили различные замыкания определяющих уравнений с целью уяснения особенностей влияния разных параметров задачи на гидротранспорт шлама. Эти исследования были сфокусированы на определении эффекта влияния различных параметров процесса бурения на гидротранспорт. Однако полное решение таких задач далеко от завершения, особенно в изучении вопроса оценки влияний реологических, динамических параметров смеси, геометрической конфигурации межтрубного пространства и ориентации ствола скважины на скорость накопления шлама. Решение этой задачи до сих пор отсутствует, хотя имеет большое практическое значение. В силу сказанного, в настоящей работе поставлена цель: провести численное моделирование в рамках методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) развивающего-

ся по времени и пространству процесса накопления шлама во внутренних системах с эксцентричным не-подвижным ядром (трубах, каналах) при различных условиях течения буровых растворов типа Гершеля–Балкли, отличающихся произвольным изменением их реологических свойств; уяснить особенности накопления шлама в практических режимах бурения, а также определить интенсивность засорения и моменты времени для очистки скважин.

#### Постановка задачи о гидродинамике смеси в горизонтально-наклонной скважине

##### Физические допущения

При построении численного решения задачи о течении реологически сложной вязкой смеси бурового раствора с твердыми частицами пробуренной породы в скважине с произвольной образующей ее ствола и эксцентрично расположенной бурильной трубой в рамках методов CFD ANSYS в настоящей работе приняты физические положения, упрощающие формулировку математической модели реального процесса гидротранспорта. Так, пренебрегая отдельными осложняющими процесс течения эффектами, которые не оказывают определяющего влияния на точность и качество анализируемого процесса, можно предположить, что результаты численного моделирования процесса бурения составят руководящие принципы инженерам для оптимизации технологического процесса бурения и интенсификации очистки горизонтальных участков скважины. Суть указанных допущений в следующем.

1. Монодисперсные частицы твёрдой фазы имеют сферическую форму. Важно отметить, что в условиях реального процесса бурения невозможно предсказать точный размер и форму частиц шлама, так как эти параметры определяются не только свойствами долота, но и особенностями структуры и свойств породы, а также временем пребывания частиц шлама в кольцевом пространстве скважины. В выраженных конвективно-диффузионных внутрь- и межфазных взаимодействиях частиц смеси процессы деформации в растворе вызывают деструкцию частиц и способствуют формированию их сферической формы. Кроме того, известно, согласно данным Э. Эпелле [31, 32], что при несферичности частиц коэффициент лобового сопротивления зависит от ориентации частиц относительно течения. Также следует учитывать, что в реальном процессе монодисперсная среда из сферических частиц имеет наихудшие условия для гидротранспорта. Все это указывает, что в действительности время пребывания и процент оставшихся частиц в скважине будет меньше, чем может ожидаться в модельных прогнозах.
2. Муфты и замки между элементами бурильной колонны не рассматриваются в геометрической конфигурации области течения смеси. Это связано с тем, что муфты достаточно разнообразны по своим геометрическим параметрам и их моделирование сильно снижает возможность обобщений результатов расчета. Более того, включение их в

формулировку краевой задачи связано с известными дополнительными затратами на реализацию алгоритма интегрирования определяющих уравнений математической модели и построения их численного решения. Поэтому большинство исследователей в своих подходах при моделировании не включали их в анализ. Стоит отметить (например, Х. Дж [24]), что в процессе бурения шлам интенсивно накапливается и локализуется именно в областях рядом с муфтами. Так как представленное исследование ориентировано на уяснение эффекта влияния реологических и технических параметров на интенсивность очистки, присутствием муфт пренебрегается. Хотя при практическом применении результатов следует учитывать негативную роль муфт на гидротранспорт шлама.

3. Предполагается, что процесс течения смеси изотермический. Хорошо известно, что изменение поля температуры влияет на морфологию буровых растворов (например, Н. Маковей [39]) и особенности, значение, масштаб влияния теплообмена на очистку до сих пор изучается (см., например, С.Н. Амзин [40]). Несмотря на это, оценка влияния неизотермичности через изменение рео- и теплофизических свойств раствора в общем виде достаточно проблематична и усложняет задачу тепло- и массопереноса в гетерогенной смеси. Все это требует использования сопряженных методов тепло- и массообмена, статистического подхода к точному описанию процессов в открытой термодинамической системе (например, смесей с составом раствора, шлама, породы и элементов технологического оборудования), а также учета особенностей режимов течения и продолжительности бурения. Поэтому инженерам первоначально рекомендуется провести анализ с целью определения влияния изменений реологических свойств раствора на структуру течения в локальных зонах межтрубного пространства, например в донной части скважины, при интересующих их режимах или условиях. И затем по этой информации следует провести прогноз гидротранспорта и определить эффективность очистки особых областей скважины.
4. Шлам не меняет свойства раствора. Известно, что глинистые пробуренные частицы могут реагировать с водой бурового раствора и влиять на его свойства. Инженеры пытаются уменьшить данный эффект. Однако Э. Каю [41] уже показал, что влияние больших частиц песка при низких концентрациях на свойства растворов ГБ незначительно. Учитывая сказанное в данном исследовании этими эффектами пренебрегается.
5. Разрушение стенок скважины не рассматривается. Важно отметить, что в процессе бурения скважин целесообразен учет эффектов, вызванных изменением локальных геологических напряжений, механических свойств прилегающих пород, корки и амплитуды шоков, а также наличием вибрации самого бурового процесса. В таких условиях часть

стенок скважин постоянно разрушается и шлам оттуда попадает в кольцевое пространство. Так как масштаб этого процесса зависит от многих факторов, обобщение его при моделировании невозможно и поэтому в данной работе не рассматривается. Тем не менее следует иметь ввиду, что результаты моделирования, скорее всего, будут преуменьшать итоговое значение концентрации шлама из-за этого допущения.

6. Столкновениями между частиц пренебрегается. Когда концентрация частиц превышает 10 % по объёмной доле, эти процессы становятся значительными. В таких условиях при построении численного решения целесообразно обращение к более сложным подходам и моделям (например, к модели ЭЭ KTGF или модели ЭЛ DEM, согласно, М. Межерихер с соавт. [42]). Заметим, в данной работе во всех случаях концентрация твёрдой фазы в канале была меньше 5 %, поэтому в расчетах принят более простой ЭЛ DPM подход (Discrete Particle Method).
7. Внешними силами, кроме сил гравитации, плавучести, градиента давления и сопротивления, оказывающими влияние на гидродинамику и массо-перенос в вязкой смеси, пренебрегается. Заметим, что сила Саффмана (например, по данным [43]) считается важной при моделировании движения частиц с размером порядка микрона и меньше в режимах при низких числах Рейнольдса частицы. Броуновская сила также считается малой и приобретает значение в процессах, когда частицы имеют размер меньше микрона [44]. Также сила, обусловленная эффектом присоединенных масс, становится значительной, когда плотность раствора больше плотности частиц. Так как в рассматриваемом исследовании анализируется течение раствора с частицами диаметром 6 мм и плотностью в 2,5 раза больше плотности раствора, то принимается, что влиянием этих сил можно пренебречь.

#### Математическая модель

В данном исследовании гидродинамика двухфазной смеси капельной жидкости с твердыми частицами описывается в рамках ЭЛ подхода, реализованного в ПК ANSYS для связанный CFD-DEM модели, при котором течение жидкой фазы (как сплошной среды) предсказывается динамическими уравнениями Навье–Стокса, а течение твердых частиц (как дискретной фазы) моделируется на основе ньютоновского закона движения. При этом межфазные эффекты учитываются в соответствующих балансовых уравнениях законов сохранений массы, а также импульса для жидкости и твердых частиц слагаемыми, представляющими собой внешние силы, ответственные за конкретные физические механизмы межфазного взаимодействия. Указанные уравнения математической модели составляют дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка, которые в рамках представленных выше допущений имеют следующий вид [45–47].

Уравнение закона сохранения массы жидкой фазы (1):

$$\frac{\partial(\alpha\rho_f)}{\partial t} + \nabla(\alpha\rho_f \vec{v}_f) = 0. \quad (1)$$

Уравнение закона сохранения импульса жидкой фазы (2):

$$\frac{\partial(\alpha\rho_f \vec{v}_f)}{\partial t} + \nabla(\alpha\rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha \nabla p + \nabla \alpha \bar{\tau}^\Sigma - \vec{S}_f + \alpha \rho_f \vec{g}. \quad (2)$$

Здесь  $\alpha$  – объемная доля жидкой фазы;  $\vec{S}_f = \sum_{i=1}^2 \frac{\vec{F}_{f,i}}{V} -$  источниковый член, включающий действие сил плавучести и сопротивления ( $\sum_{i=1}^2 \vec{F}_{f,i} = \vec{F}_a + \vec{F}_D$ ,  $\vec{F}_a = -\frac{1}{6} \pi d^3 \rho_f \vec{g}$ ).

Отметим, что в настоящем исследовании определение морфологических свойств вязкой среды выполняется с применением кинетической теории, предложенной к описанию гранулярного многофазного течения в рамках ПО ANSYS CFD. В частности принято, что в рамках RANS-подхода статистической теории турбулентности [48, 49] тензор эффективных напряжений в течениях смеси ( $\bar{\tau}^\Sigma$ ) с ламинарным ( $l$ ) и турбулентным ( $t$ ) процессами переноса импульса жидкой фазы описывается в виде  $\bar{\tau}^\Sigma = \bar{\tau}_l + \bar{\tau}_t$ , где обозначено, что тензор вязких напряжений в условиях ламинарного течения ( $\bar{\tau}_l$ ) есть (3):

$$\bar{\tau}_l = 2\mu \left[ \bar{\dot{S}} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \vec{v}_f) \bar{I} \right], \quad (3)$$

а соответствующий тензор при турбулентном течении ( $\bar{\tau}_t$ ) имеет вид (4):

$$\bar{\tau}_t = 2\mu_t \left[ \bar{\dot{S}} - \frac{1}{3} k \cdot \bar{I} \right], \quad (4)$$

где  $k = \frac{\bar{\rho}_f \bar{u}'_f \bar{u}'_f}{2}$ ,  $i = \overline{1,3}$  – кинетическая энергия ( $k$ )

турбулентности пульсационного движения;

$\bar{\dot{S}} = \frac{1}{2} [\nabla \vec{v}_f + (\nabla \vec{v}_f)^T]$  – тензор скоростей деформаций жидкой фазы соответственно.

Причем динамическая вязкость ( $\mu$ ) для ньютоновской жидкости типа Гершеля–Балкли [50] определяется связью (5):

$$\begin{cases} \mu = \mu_{\text{пред}}, \quad \dot{S} < \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}} \\ \mu = \frac{\tau_0 + \kappa [\dot{S}'' - (\tau_0 / \mu_{\text{пред}})'']}{\dot{S}}, \quad \dot{S} \geq \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}} \end{cases} \quad (5)$$

Кроме того, при формулировке вязкости в виде скалярной функции от тензора скоростей деформаций ( $\bar{\dot{S}}$ ) учитывается, что в смеси со свойствами несжимаемого течения имеет место  $\mu = \mu(I_2)$ , где  $I_2 = (\bar{\dot{S}}; \bar{\dot{S}}) = \sum_{i,j=1}^3 \dot{S}_{ij} \dot{S}_{ji}$  – второй инвариант тензора деформаций. Это позволяет представить эффективную

вязкость неньютоновской среды в виде функций  $\mu = \mu((\bar{S}; \bar{S})$  или  $\mu = \mu((\bar{\tau}; \bar{\tau})$ ). В силу сказанного в (5) принято  $\bar{S} = \sqrt{0,5(\bar{S}; \bar{S})}$ ,  $\tau_0^2 = 0,5(\bar{\tau}; \bar{\tau})$ .

Турбулентные характеристики смесевого течения ( $\mu_t$ ) определяются по однофазной версии двухпараметрической  $k\omega$ -SST модели сдвиговых напряжений RANS-подхода, представленной в работах Ф. Ментера [51, 52], которые связывают тензор турбулентных напряжений ( $\bar{\tau}_t$ ) с компонентами тензора скоростей ( $\bar{S}$ ) осредненного движения в виде (4). Заметим, что выбор указанной модели обусловлен необходимостью корректного расчета течений в широком диапазоне условий течения турбулентного потока, особенно в низкорейнольдсовых зонах межтрубного пространства, и устойчивостью численного решения в областях межфазного взаимодействия частиц смеси. Расчетами установлено, что по этим факторам  $k\omega$ -SST модель имеет преимущества перед стандартными версиями  $k\epsilon$ ,  $k\omega$ -моделями, отдельный вид которых следующий (6)–(13) [48, 51–54]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i k)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega, \quad (6) \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i \omega)}{\partial x_i} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \\ &+ 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}. \quad (7) \end{aligned}$$

Здесь обозначено

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega^2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\}, \quad (8)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2 \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right), \quad (9)$$

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)},$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[ \max \left( \frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\}, \quad (10)$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \beta^* &= 0,09, \quad \alpha_1 = 5/9, \quad \alpha_2 = 0,44, \\ \beta_1 &= 3/40, \quad \beta_2 = 0,0828, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sigma_{k1} = 0,85, \quad \sigma_{k2} = 1, \quad \sigma_{\omega 1} = 0,5, \quad \sigma_{\omega 2} = 0,856. \quad (13)$$

Уравнение движения твердых частиц с учетом действия комбинации сил плавучести и тяжести, силы градиента давления и силы межфазного взаимодействия (сопротивления) соответствует виду (14), (15):

$$m_p \frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} = \vec{F}_v + \vec{F}_D + \vec{F}_{pres}, \quad (14)$$

где обозначено

$$\begin{aligned} \vec{F}_v &= (\rho_p - \rho_f) \vec{g} V_p, \quad \vec{F}_{pres} = -V_p \nabla p, \\ \vec{F}_D &= \frac{c_d \rho_f A_p}{2} |\vec{v}_f - \vec{v}_p| (\vec{v}_f - \vec{v}_p). \end{aligned} \quad (15)$$

Причем  $A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}$  – проекция площади частиц;

$V_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3$  – объем частицы; а  $c_d$  – коэффициент сопротивления, определенный по данным А. Александера и С. Морси [55] в виде (16):

$$c_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re}, \quad Re = \frac{\rho_f^0 d_p |\vec{v}_f - \vec{v}_p|}{\mu_f}, \quad (16)$$

где коэффициенты  $a_i$  ( $i = \overline{1,3}$ ), значения которых неуниверсальны относительно изменений чисел Рейнольдса, согласно данным [55], являются эмпирическими (табл. 1).

**Таблица 1. Коэффициенты Александера и Морси**  
**Table 1. Alexander and Morsi coefficients**

Re <sub>min</sub>	Re <sub>max</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>
0	0,1	0	24	0
0,1	1	3,690	22,73	0,0903
1	10	1,222	29,1667	-3,8889
10	100	0,6167	46,50	-116,67
100	1000	0,3644	98,33	-2778
1000	5000	0,357	148,62	-47500
5000	10000	0,46	-490,546	578700
10000	–	0,5191	-1662,5	5416700

При построении численного решения рассматриваемой задачи используются следующие *граничные условия*. На входе изотермического стационарного течения дисперсной смеси в скважину (кольцевой эксцентричный канал) принимаются однородные профили фаз (известные для процесса с фиксированной загрузкой частиц) по поперечному сечению, а также, что фазы находятся в равновесии. На выходе – «мягкие» граничные условия (непрерывности течения). На стенках коаксиального пространства (внутренней и внешней трубы) выставляются следующие условия. Так, для диспергированной (несущей) фазы формулируются условия прилипания для всех осредненных и пульсационных характеристик капельной жидкости, для частиц шлама – условия проскальзывания. Для анализа процессов транспорта смеси в условиях реального режима бурения, соответствующего выработке породы при нестационарной и равномерной по времени загрузке твердых частиц, наряду с указанными условиями для развивающегося по пространству течения смеси в области входа задается соответствующий однородный по поперечному сечению профиль частиц, непрерывно поступающих в скважину.

С целью уяснения особенностей режимов течения смеси как реологически сложной среды в настоящем

исследовании принималось, что течение жидкостей типа ГБ в кольцевом пространстве при обычных буровых условиях должно соответствовать ламинарному течению. Причем выбор параметров расчета подтверждался данными, сформулированными по критериальным связям, предложенными А. Бушем [56], Г. Лиу [57] в виде (17)–(21):

$$Re = \frac{4(2n+1)}{n} \left[ \frac{7,48 \rho v^{2-n} \left( \frac{d_2 - d_1}{24} \right)^n}{\tau_0 \left( \frac{d_2 - d_1}{24v} \right)^n + 0,0021k \left( \frac{2(2n+1)}{nc_a} \right)^n} \right], \quad (17)$$

$$c_a = 1 - \left( \frac{1}{n+1} \right) \times$$

$$\times \frac{\tau_0}{\tau_0 + 0,0021k \left\{ \frac{0,0044q(2n+1)}{n\pi \left[ \frac{d_2}{24} - \frac{d_1}{24} \right] \left[ \left( \frac{d_2}{24} \right)^2 - \left( \frac{d_1}{24} \right)^2 \right]} \right\}^n}, \quad (18)$$

$$Re_c = \left[ \frac{8(2n+1)}{ny} \right]^{\frac{1}{1-z}}, \quad (19)$$

$$y = \frac{\log n + 3,93}{50}, \quad (20)$$

$$z = \frac{1,75 - \log n}{7}. \quad (21)$$

Здесь единицы измерений параметров отвечают системе США, т. е.  $v$  – скорость, [фут/с];  $\rho$  – плотность [фунт/галлон];  $q$  – дебит [галлон/мин];  $k$  – индекс консистенции [сантипойз];  $\tau_0$  – предел текучести [фунт/100фут<sup>2</sup>].

Особенности геометрической и гидродинамической конфигурации задачи

Исследуемая геометрия является кольцевым пространством между двумя эксцентричными трубами с диаметрами 20 и 12 см, а также их характерной длиной 10 м. Принимается, что эксцентричность канала равна 75 % (рис. 1).

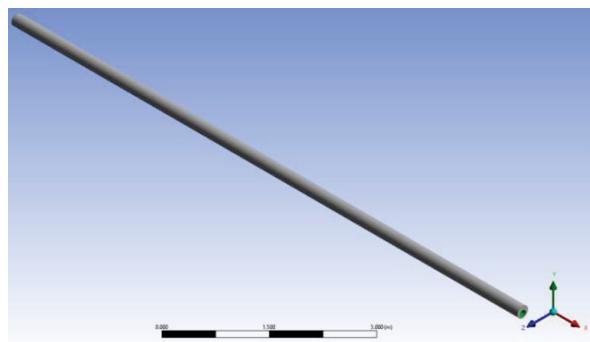


Рис. 1. Геометрия кольцевого цилиндрического канала с длиной 10 м и двух труб с диаметрами 12 и 20 мм при эксцентричности 75 %

Fig. 1. Geometry of an annular cylindrical channel with a length of 10 m and two pipes with diameters of 12 and 20 mm with an eccentricity of 75 %

Предполагается, что по этому каналу течет базовый полимерный раствор типа ГБ, приготовленный Р. Ахмедом и С. Мицка [58], с плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup> и реологическими параметрами, показанными в табл. 2.

Таблица 2. Реологические параметры исследуемого раствора

Table 2. Rheological parameters of the studied drilling fluids

Название раствора Fluid name	Предел текучести, Па Yield strength, Pa	Индекс консистенции, Па·с <sup>n</sup> Consistency index, Pa·s <sup>n</sup>	Индекс потока Flow index
XCD5	6,5	0,640	0,48

В качестве твёрдой фазы были использованы сферические частицы песка диаметром 6 мм и плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup>, которые соответствуют скорости бурения с разными дебитами входящей жидкости в скважину. Диапазон исследуемых параметров показан в табл. 3.

Таблица 3. Диапазон исследуемых параметров

Table 3. Range of studied parameters

Индекс потока $n$ /Flow index $n$	0,4, 0,48, 0,8
Индекс консистенции $k$ , Па·с <sup>n</sup> Consistency index, Pa·s <sup>n</sup>	0,3, 0,64, 1,4
Предел текучести, Па/Yield strength, Pa	1, 6,5, 15
Скорость бурения, м/ч (частицы/с) Penetration rate, mph	5 (282), 10 (564), 20 (1128)

Приняты следующие граничные условия течения к построению численного решения в рамках ПО ANSYS CFD-DEM подхода. Раствор входит в канал со средней скоростью 2 м/с (velocity inlet) и на выходе давление равно нулю (pressure outlet), и поток не может возвращаться в канал (no back flow). Течение на стенках отсутствует. Кроме того, частицы также поступают в канал (с интервалом через несколько шагов по времени, в соответствии со скоростью бурения). Считается, что при взаимодействии частиц со стенами канала или после пересечения выходного сечения их траектории заканчиваются и они прекращают свое движение (Trap Boundary Condition). Заметим, что для указанных условий из (17)–(21) имеем  $Re=1051$  и  $Re_c=5881$ , следовательно, течение является ламинарным.

#### Детали численного алгоритма и его верификация

Достоверность результатов моделирования оценивалась тестированием численного алгоритма, модели и метода на классе известных решений, установлением соответствия с имеющимися опытными данными, а также по информации о пригодности разностной сетки с точки зрения ее оптимальности, экономичности и эффективности к прогнозу особенностей гидротранспорта при сложном течении дисперсной смеси в трубах и каналах с эксцентричным ядром. В рамках метода вложенных сеток установлено, что оптимальной следует считать сетку, при которой точность расчета поля давления в контрольных объемах не превышала погрешности 2 %. Вид такой разностной сет-

ки иллюстрирует рис. 2. Кроме того, в литературе уже имеется ряд полуэмпирических уравнений для расчёта перепада давления в концентричном кольцевом пространстве для ньютоновских жидкостей при ламинарном и турбулентном режимах. Поэтому в работе использовался подход к тестированию алгоритма и сетки на течениях в концентричных кольцевых трубах, затем выполнялись расчеты течений в эксцентричных внутренних системах и устанавливалось соответствие расчетов с имеющимися (точными и опородованными) экспериментальными данными. Принималось, что перепад давления при ламинарном течении вязких гомогенных сред в кольцевых областях можно рассчитать по соотношению (22), представленному Р. Шищенко и Б. Есьман [59]:

$$v = \frac{p}{8\mu l} \left( b^2 + a^2 + \frac{b^2 - a^2}{\ln(a/b)} \right). \quad (22)$$

Здесь  $a$  и  $b$  – радиусы внутренней и внешней труб;  $l$  – их длина;  $v$  – средняя скорость потока;  $p$  – перепад давления;  $\mu$  – динамическая вязкость ньютоновского потока.

В нашем случае с концентричными трубами и водой ( $V=0,01$  м/с,  $l=10$  м,  $b=0,1$  м,  $a=0,06$  м,  $\mu=0,001003$  кг/мс,  $Re=800$ ) ожидаемый перепад давления составил величину 0,7490 Па.

Другое соотношение (23), представленное Б. Гуо [60], даёт похожие результаты:

$$p = \frac{\mu v l}{0,0209(b-a)^2}. \quad (23)$$

Здесь перепад давления равен 0,7498 Па. Видно, что по (22), (23) результаты довольно близки. Также в табл. 4. приведены результаты моделирования перепада давления на сетках различного размера при ламинарном течении ( $Re=800$ ).

**Таблица 4.** Данные перепада давления при разных расширениях расчётной сетки

**Table 4.** Pressure drop at different grid sizes

Расширение ( $r^*\Theta^*z$ ) Resolution ( $r^*\Theta^*z$ )	Перепад дав- ления Pressure drop	% отлияя от % of variation from	
		(22)	(23)
40*40*200	0,7880606	5,2	5,1
40*40*300	0,7878114	5,2	5,06
50*40*200	0,7884978	5,3	5,15
40*50*200	0,7865344	5	4,89
40*60*100	0,7861123	5	4,84
40*60*50	0,7864677	5	4,88
50*60*50	0,7869135	5,1	4,94

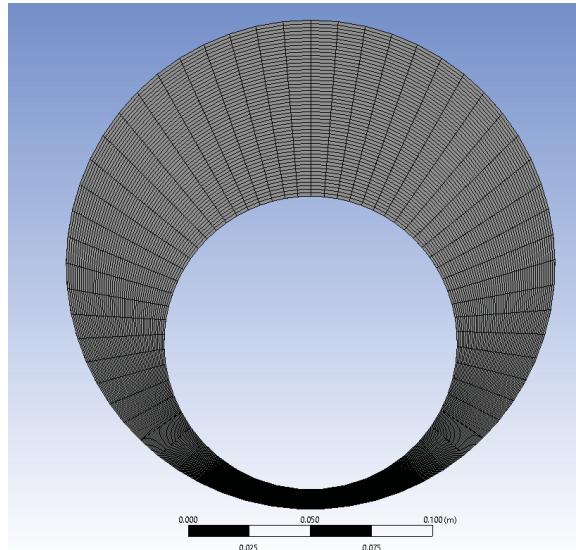
Представленные сведения позволяют считать разностную сетку с расширением 50\*60\*50, имеющую 137500 ячеек, оптимальной (рис. 2).

Стоит отметить, что для ламинарного течения жидкостей типа ГБ таких аналитических соотношений довольно мало, но есть эмпирические связи, например, приведенные в работах Б. Гуо [60], которые сформулированы для системы единиц США типа (24):  $v$  – скорость [фут/с];  $\rho$  – плотность [фунт/галлон];  $q$  – дебит [галлон/мин];  $k$  – индекс консистенции

[сантипуаз];  $\tau_0$  – предел текучести [фунт/100 фут<sup>2</sup>] и  $\Delta l$  – длина канала [фут]:

$$\Delta p = \frac{4k}{14400(d_2 - d_1)} \times \left\{ \frac{\tau_0}{k} + \left[ \left( \frac{16(2n+1)}{nc_a(d_2 - d_1)} \right) \left( \frac{q}{\pi(d_2^2 - d_1^2)} \right) \right]^n \right\} \Delta l. \quad (24)$$

Причем константа  $c_a$  в (24) определяется по связи (18). Так, наши расчеты на указанной сетке показывают, что перепад давление равен 19316 Па/м, а по соотношениям (24) –  $\Delta p=17818$  Па/м, т. е. разница между данными настоящего моделирования и указанными связями составляет 8,41 %.



**Рис. 2.** Разностная сетка с расширением 50\*60\*50, включающая 137500 ячеек для расчета гидротранспорта в эксцентричной трубе

**Fig. 2.** Grid with a resolution of 50\*60\*50, including 137500 cells, for the calculation of cutting transportation in an eccentric pipe

К сожалению, эксцентричность влияет на перепад давления по-разному при различных значениях параметров, характеризующих величину отношения диаметров труб, реологических свойств и скоростях потока на входе в скважину (например, М. Хаджиисламоглу [61]). Кроме того, экспериментальных данных, отражающих моделируемые сценарии, также не было найдено. Но чтобы убедиться в корректности алгоритма решения привлекались экспериментальные данные из [58], которые соответствуют жидкости с параметрами: предел текучести – 3,7 Па; индекс консистенции – 0,425 Па·с<sup>n</sup>; индекс потока – 0,645. Такое течение происходит в канале с геометрией: длина – 3,658 м; диаметры трубы – 35,05 и 17,15 мм; эксцентричность – 100 %. После моделирования этого сценария (с эксцентричностью 95 %) были получены результаты, представленные на рис. 3. Эти данные свидетельствуют о пригодности выбранного алгоритма и расчётной сетки к описанию деталей гидротранспорта реологически сложной среды.

Стоит отметить, что численное решение проводится в рамках ПО ANSYS FLUENT 2021 R1 на ПК с процессором Intel(R) Core (TM) i7-10750H CPU 2,59 ГГц, 16 ГБ оперативной памяти по алгоритму Hard Coupling, который соответствует выполнению следующих блоков расчета гидродинамики гетерогенной среды в процедуре установления численного решения с шагом по времени  $\Delta t_y=10^{-3}$  с.

1. Рассчитывается изменение поля скорости потока несущей фазы по пространству (до введения дискретной фазы).
2. Вводится дискретная фаза, вычисляются траектории частиц дискретной фазы.
3. Пересчитывается поле скорости капельной жидкости с использованием замыканий межфазных процессов в обмене импульсом (теплом и массой).

4. Пересчитываются траектории частиц в модифицированном поле скорости жидкой фазы.
5. Повторяются предыдущие два шага до тех пор, пока не будет достигнута сходимость численного решения (в нашем случае погрешность вычисления локальных значений в итерационном процессе составляет меньше  $10^{-4}\%$ ).
6. Осуществляется переход на следующий временной шаг, и повторяются указанные операции численного интегрирования системы определяющих уравнений математической модели.

При определении поля давления был взят алгоритм PISO [62] вместо алгоритма SIMPLE [63]. Предварительные расчеты показывают, что оба алгоритма дают почти одинаковые результаты, но при PISO значительно быстрее достигается сходимость численного решения при использовании неортогональных расчётных сеток.

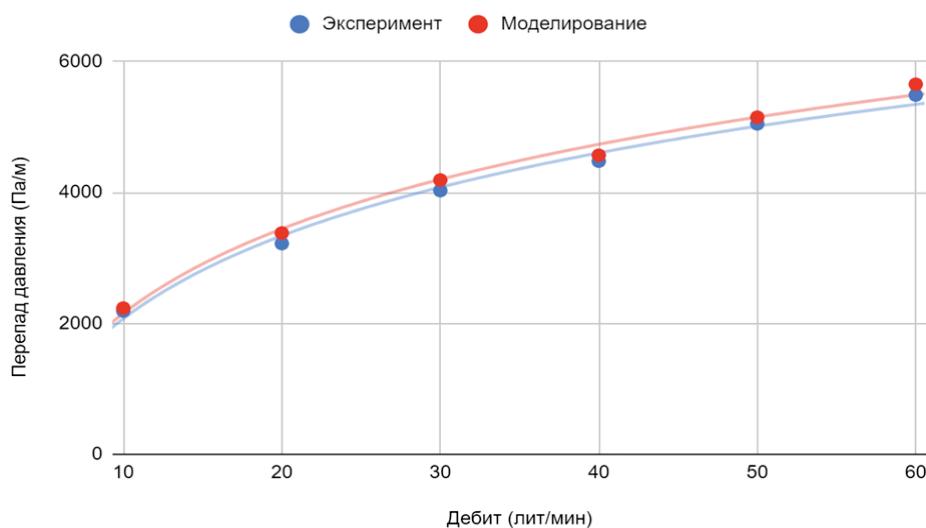


Рис. 3. Распределения перепада давления в зависимости от дебита. Сравнение экспериментальных результатов [58] с данными настоящего моделирования

Fig. 3. Distributions of differential pressure depending on production rate. Comparison of experimental results [58] with the data of the present simulation

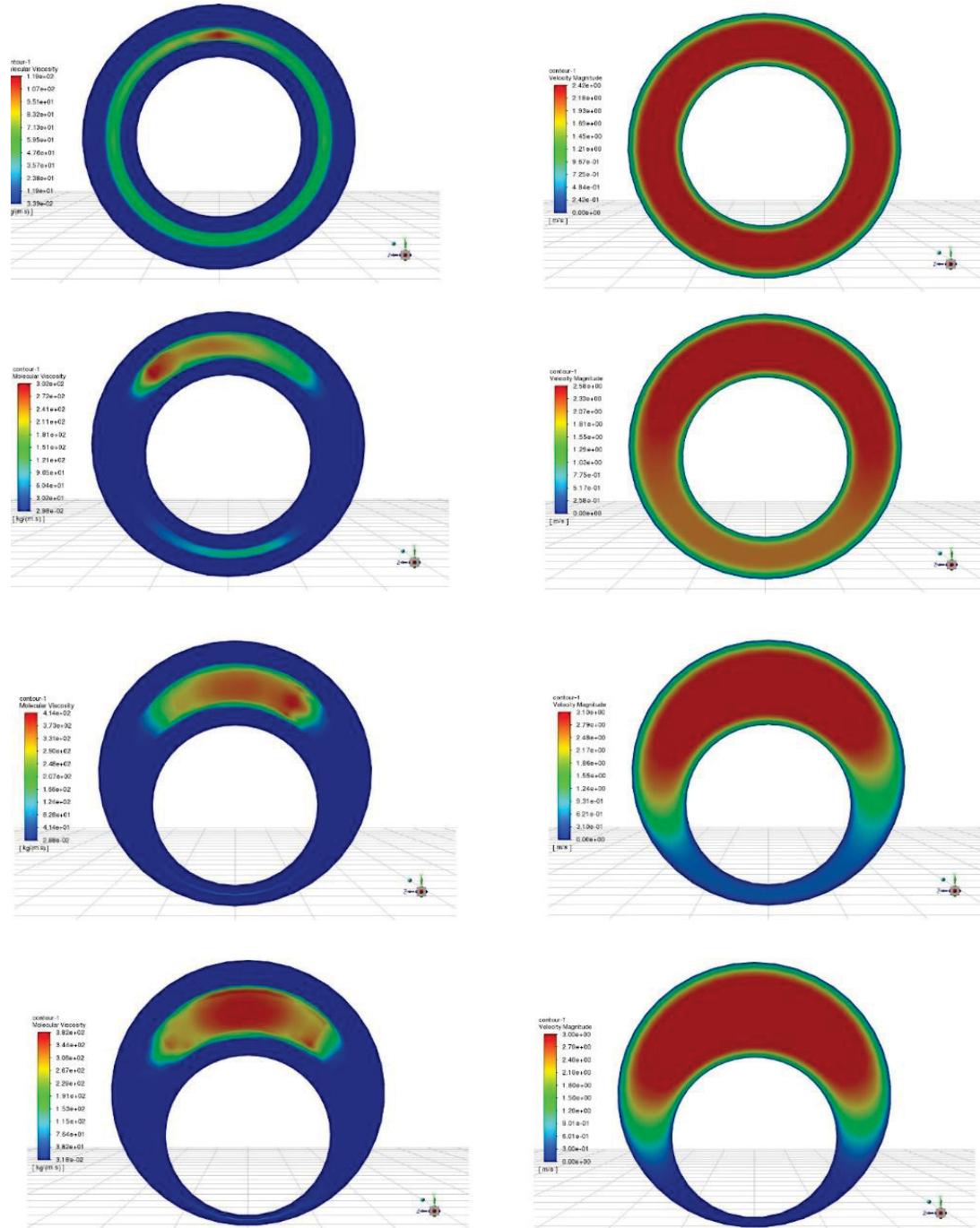
### Результаты и их обсуждение

Течение жидкостей ГБ в эксцентричном канале сопровождается двумя важными эффектами, уже известными из ранних работ (например, Е.В. Подрябинкин [64]). Эти два эффекта иллюстрируют данные, представленные на рис. 4. Из него видно, что с увеличением эксцентричности скорость потока в нижней части поперечного сечения межтрубного пространства уменьшается почти до нуля. Более того, в срединной части поперечного сечения межтрубного пространства, удаленной от действия стенок, существуют сравнительно низкие скорости деформаций, что определяет зону высокой вязкости потока (рис. 4, картины слева). Подчеркнем, что комбинация этих эффектов определяет эффективность гидротранспорта: частицы твердой фазы, поступающие в зону высокой вязкости, продолжают двигаться по линиям тока частиц капельной жидкости, в то время как другие частицы шлама, попадая в донную область поперечного сечения трубы, теряют способность к переносу, осаждаются и образуют постепенно возрастающую в

размерах шламовую постель. Это следует из формулировки числа Стокса ( $Stk=\tau_{pb}/\tau_{rd}$ ), представляющего собой отношение времени динамической релаксации частиц ( $\tau_{pb}=(\rho_p^0 d_p^0)/(18\mu)$ ) к характерному гидродинамическому времени процесса ( $\tau_{rd}=L/U_b$ ). Так, если  $Stk \ll 1$ , то имеет место динамически равновесное течение дисперсной среды. В этом случае частицы фаз имеют очень близкие значения скоростей и вся смесь движется по законам однофазной жидкости с эффективными свойствами, определяемыми морфологией неньютоновской жидкости по линиям тока частиц жидкой фазы. Но при  $Stk \gg 1$  формируются условия течения, при которых частицы дисперсной фазы слабо реагируют на изменения динамики частиц жидкости, они следуют по своим индивидуальным траекториям и осаждаются от совокупного на них действия внешних сил и сил межфазного взаимодействия. В частности, из формулировки  $Stk$  следует, что в областях повышенной вязкости время релаксации будет меньше и, соответственно, число Стокса будет невелико. Причем, если его значение оказывается меньше

единицы, возникают признаки однофазного потока. Данные на рис. 5 демонстрируют пространственные особенности эволюции динамической структуры частиц в эксцентричной трубе. Следует отметить, что расчеты выполнены при течении жидкости XCD5 со средней скоростью в области входа, равной 2 м/с, и отвечают его состоянию на момент времени 240 с. Условия течения соответствуют сценарию развивающегося по пространству течения смеси с нестацио-

нарной однородной по поперечному сечению межтрубного эксцентричного пространства загрузкой частиц в области входа. Из рис. 5 видно, что частицы твердой фазы (показаны точками с характерным цветом, подчеркивающим скорость их движения) двигаются либо по зоне высокой вязкости, либо осаждаются в донной области трубы и там накапливаются (осевая скорость таких частиц мала, на что указывает синий цвет шкалы данных расчета).



**Рис. 4.** Картинки радиальных распределений эффективной вязкости (слева) и осевой компоненты вектора скорости потока (справа) в выходном сечении трубы при различных значениях эксцентричности (0, 20, 60 и 80 %). Расчеты отвечают течению жидкость XCD5 со средней скоростью во входном сечении, равной 2 м/с

**Fig. 4.** Pictures of radial distributions of the effective viscosity (left) and the axial component of the flow velocity vector (right) in the outlet section of the pipe at various values of eccentricity (0, 20, 60 and 80 %). The calculations correspond to the XCD5 fluid flow with an average velocity in the inlet section equal to 2 m/s

Также из результатов расчета следует, что, во-первых, нельзя полностью очистить канал только гидродинамическим способом, т. к. в любом случае будут частицы, которые попадают в донную область канала, где отсутствует течение. Во-вторых, ширина зоны высокой вязкости определяет процент частиц, которые способны к транспортировке по длине трубы. Такие частицы могут выноситься потоком из межтрубного пространства скважины в процессе гидротранспорта. Это факт подчеркивает эффективность гидродинамической очистки. Как показано в [65–67], следствием изменений реологических параметров несущей жидкости, формирующих размеры зоны высокой вязкости, выступают эффекты, представленные в табл. 5.

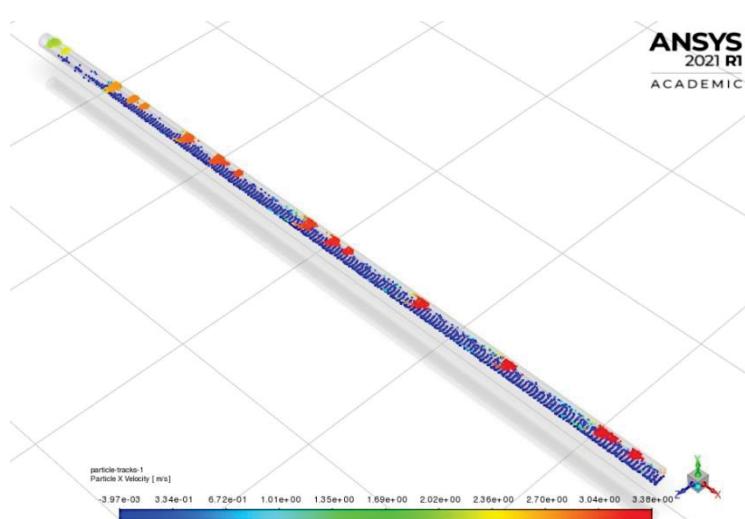
Учитывая это, авторы рекомендуют для гидротранспорта жидкости с малыми значениями индексов консистенции и потока, т. к. они улучшают перенос

частиц и одновременно уменьшают перепад давления. Результаты расчетов, представленные рис. 6–8, иллюстрируют эти особенности.

**Таблица 5. Влияние реологических параметров на гидротранспорт**

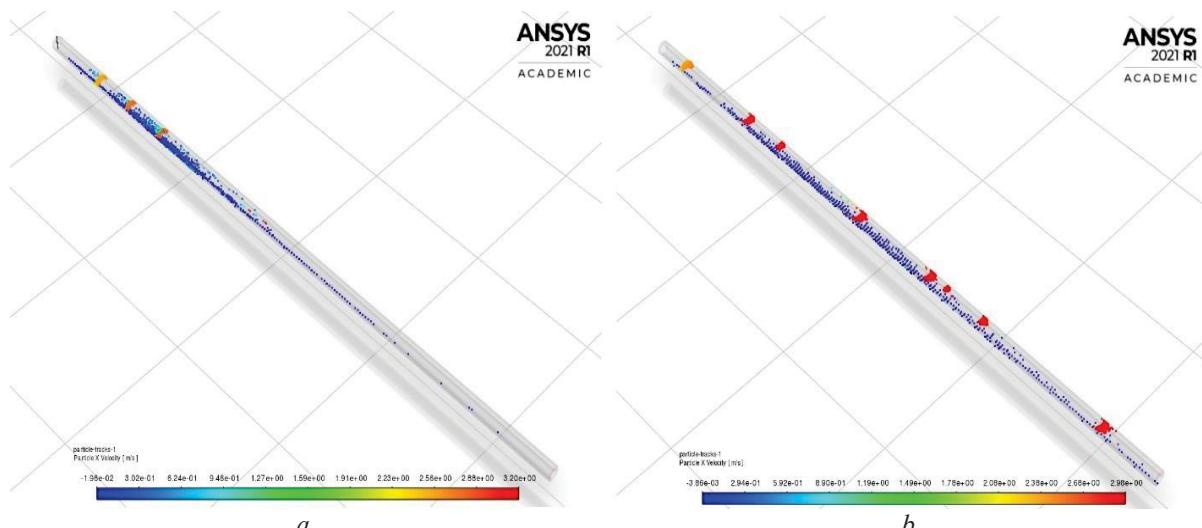
**Table 5. Effect of rheological parameters on cuttings transport**

Параметр Parameter	Эффект на ширину зоны высокой вязкости Effect on the width of hi-vis zone	Эффект на перепад давления Effect on pressure drop
Передел текучести (Yield strength)	Прямой (direct)	Прямой (direct)
Индекс консистенции (Consistency index)	Обратный (opposite)	Прямой (direct)
Индекс потока (Flow index)	Обратный (opposite)	Прямой (direct)



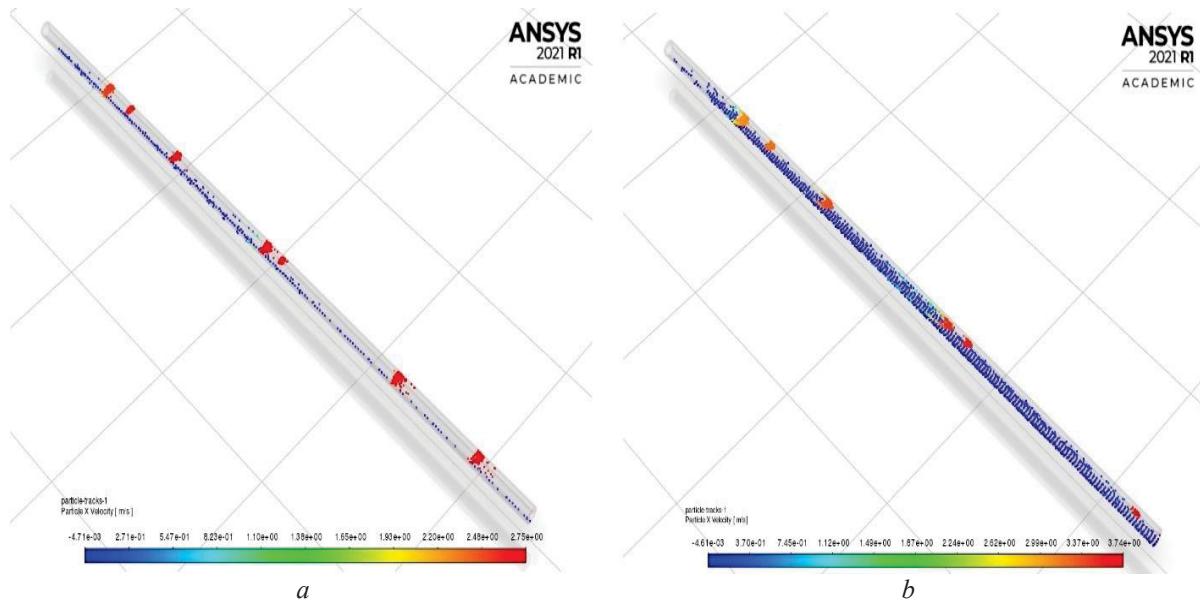
**Рис. 5. Распределения осевой компоненты вектора скорости частиц твердой фазы при течении в кольцевой эксцентричной трубе**

**Fig. 5. Distribution of the axial component of the particle velocity vector of the solid phase during flow in an annular eccentric pipe**



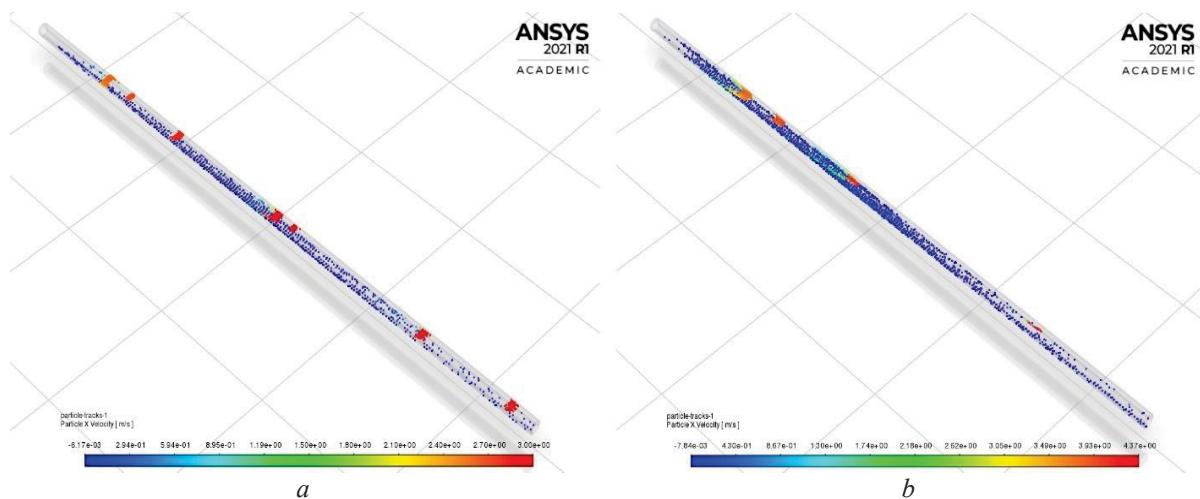
**Рис. 6. Картинки изменений осевой компоненты вектора скорости частиц твердой фазы при различных значениях предела текучести жидкости: а)  $\tau_0=1$  Па; б)  $\tau_0=15$  Па, после 100 с/20 циклов течения. Расчеты выполнены при течении жидкости XCD-5 в трубе с параметрами: скорость входа – 2 м/с; длина канала – 10 м; диаметр труб – 20 и 12 см; эксцентричность – 75 %**

**Fig. 6. Patterns of changes in the axial component of the particle velocity vector of the solid phase at different values of the liquid yield strength a)  $\tau_0=1$  Pa; b)  $\tau_0=15$  Pa, after 100 s/20 flow cycles. Calculations were performed with XCD-5 fluid flow in a pipe with the following parameters: entry speed – 2 m/s; channel length – 10 m; pipe diameter – 20 and 12 cm; eccentricity – 75 %**



**Рис. 7.** Картинки изменений осевой компоненты вектора скорости частиц твердой фазы при различных значениях индекса консистенции жидкости: a)  $k=0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ; b)  $k=1,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ , после 100 с/20 циклов течения. Расчеты соответствуют условиям, указанным на рис. 6

**Fig. 7.** Patterns of change in the axial component of the particle velocity vector of the solid phase at different values of the liquid consistency index: a)  $k=0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ; b)  $k=1,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ , after 100 s/20 flow cycles. The calculations correspond to the conditions indicated in Fig. 6



**Рис. 8.** Картинки изменений осевой компоненты вектора скорости частиц твердой фазы при различных значениях индекса потока: a)  $n=0,4$ ; b)  $n=0,8$ . Расчеты соответствуют условиям, указанным на рис. 6

**Fig. 8.** Patterns of change in the axial component of the particle velocity vector of the solid phase at different values of the flux index: a)  $n=0,4$ ; b)  $n=0,8$ . The calculations correspond to the conditions indicated in Fig. 6.

Расчеты показывают, что остановить процесс накопления шлама в скважине в условиях отсутствия вращения бурильной трубы только гидродинамическим способом маловероятно, т. к. динамика потока сопровождается постоянным ростом числа осаждаемых частиц в кольцевом пространстве со временем. Данные рис. 9 иллюстрируют особенности такого процесса при различных скоростях бурения.

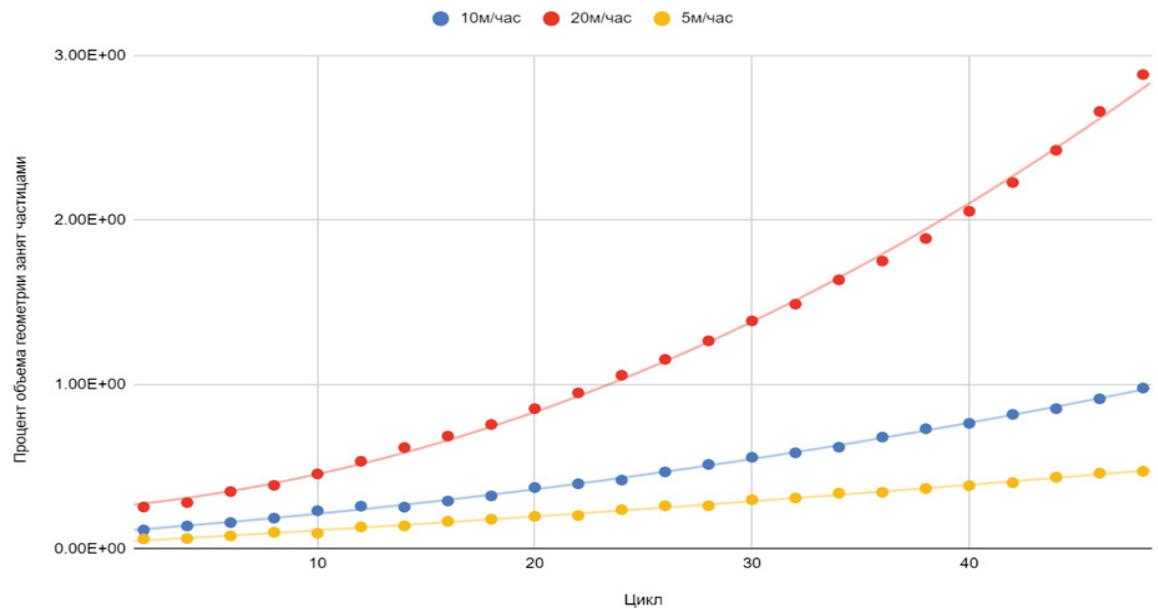
Рис. 10–12 показывают влияние реологических параметров на скорость накопления шлама. Как отмечалось выше, расчетами установлено, что с повышением предела текучести и уменьшением индексов потока и консистенции наблюдается уменьшение скоро-

сти накопления шлама (интенсификация очистки скважин процессом гидротранспорта).

В качестве практических рекомендаций по применению результатов моделирования к прогнозу процесса бурения полезно учитывать следующие выводы. Так, расчеты демонстрируют, что течение само по себе не способно полностью очистить скважину. В таких условиях естественно возникает момент времени, когда масса пробуренного шлама становится насколько значительной в скважине, что может причинить технические проблемы при бурении. Согласно критерию Р. Пиготта [1], эту максимальную концентрацию определяют величиной в 5 % объема канала, после чего рекомендуется приостановить

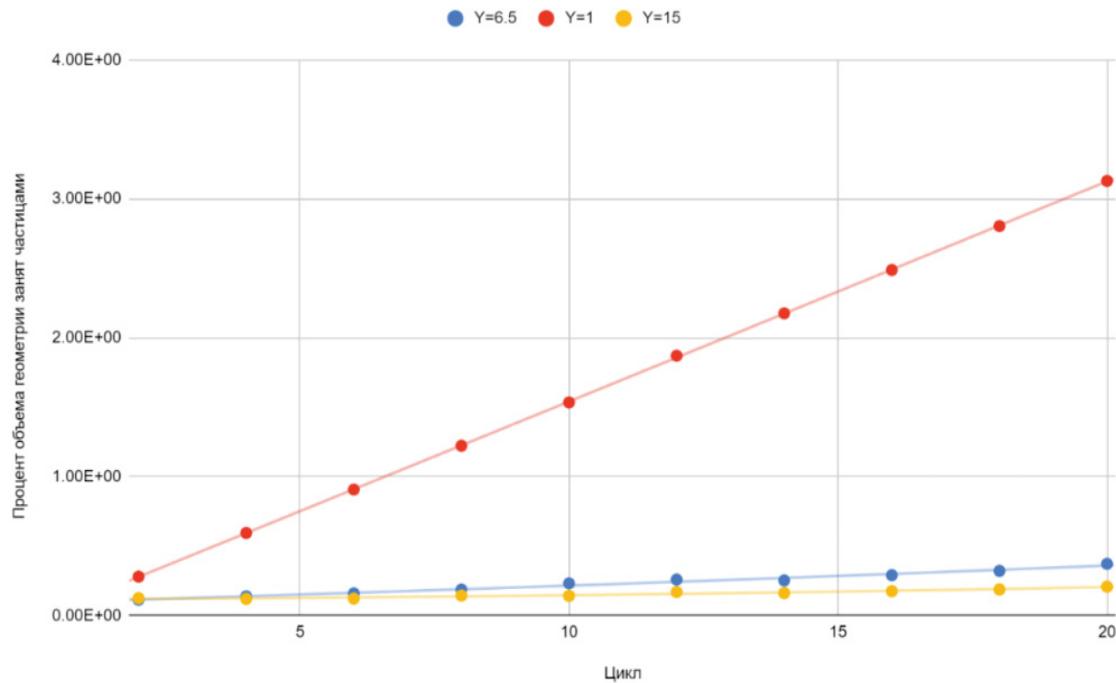
бурение и провести механическую очистку (шаблонировку). Как уже сказано, этот процесс нецелесообразен в силу материальных затрат, поэтому оптимизация частоты его проведения способствует экономическому улучшению процесса бурения. Настоящие расчеты процесса очистки демонстрируют практическую значимость представленной методологии в том смысле, что, выбирая го-

ризонтальный участок скважины, например, длиной порядка одного километра, по данным расчета (табл. 6) можно спрогнозировать продолжительность бурения до момента, когда концентрация шлама в кольцевом пространстве не достигает 5 % при разных значениях реологических параметров бурового раствора с одной скоростью бурения (например, 10 м/ч).



**Рис. 9.** Линии распределений накопления частиц твёрдой фазы в зависимости от времени при различных скоростях (5, 10, 20 м/ч). Расчеты выполнены в условиях: жидкость XCD-5; средняя скорость на входе – 2 м/с; длина трубы – 10 м; эксцентричность – 75 %

**Fig. 9.** Plots of accumulation of solid phase particles depending on time at different penetration rates (5, 10, 20 m/h). The calculations were performed under the following conditions: liquid XCD-5; average speed at the entrance – 2 m/s; pipe length – 10 m; eccentricity – 75 %



**Рис. 10.** Линии распределений накопления шлама в зависимости от времени при разных значениях предела текучести (обозначен Y, Па). Расчеты отвечают условиям, представленным на рис. 6

**Fig. 10.** Plots of cuttings accumulation depending on time at different values of the yield strength (indicated by Y, Pa). The calculations correspond to the conditions presented in Fig. 6

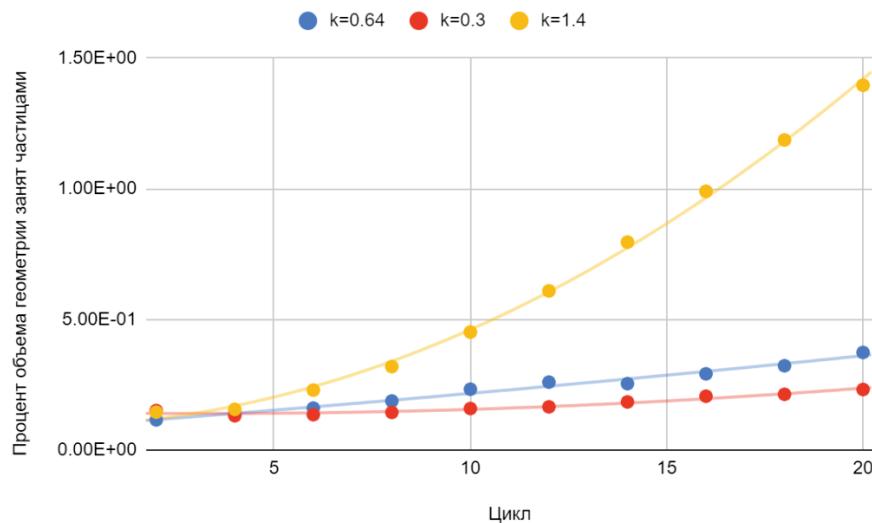


Рис. 11. Линии распределений накопления шлама в зависимости от времени при разных значениях индекса консистенции  $k$ . Расчеты отвечают условиям, представленным на рис. 6

Fig. 11. Plots of cuttings accumulation depending on time for different values of the consistency index  $k$ . The calculations correspond to the conditions presented in Fig. 6

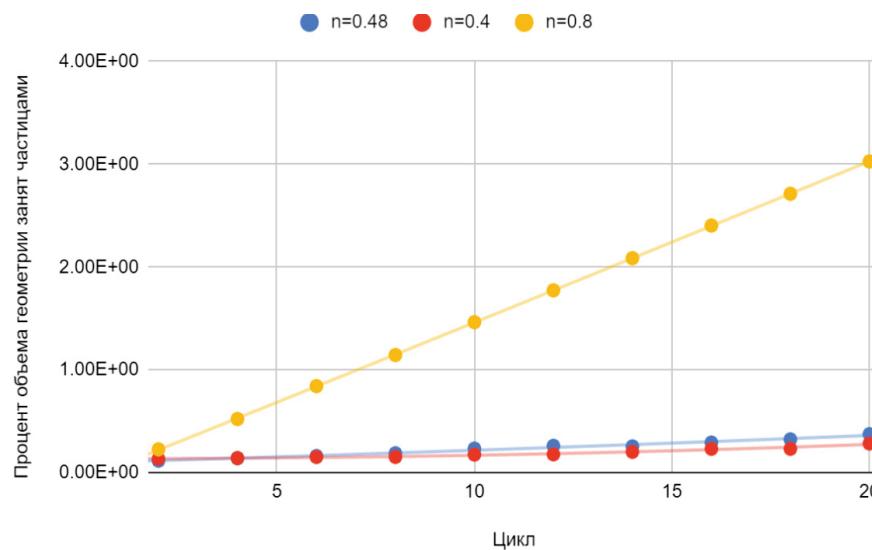


Рис. 12. Линии распределений накопления шлама в зависимости от времени при разных значениях индекса потока  $n$ . Расчеты отвечают условиям, представленным на рис. 6

Fig. 12. Plots of cuttings accumulation depending on time for different values of the flow index  $n$ . The calculations correspond to the conditions presented in Fig. 6

Таблица 6. Пример расчёта продолжительности бурения (скорость прохода – 10 м/ч, длина горизонтального участка – 1000 м и средняя скорость потока на входе – 2 м/с)

Table 6. Example of drilling duration calculation (penetration rate is 10 m/h, horizontal section length is 1000 m and average inlet flow rate is 2 m/s)

Передел текучести, Па Yield strength, Pa	Индекс консистенции, Па·с <sup>n</sup> Consistency index, Pa·s <sup>n</sup>	Индекс потока Flow Index	Продолжительность бурения, м Drilling duration, m
6,50	0,640	0,48	194
1	0,640	0,48	43
15	0,640	0,48	251
6,5	0,03	0,48	169
6,5	1,4	0,48	55
6,50	0,640	0,4	160
6,50	0,640	0,8	45

Подобные таблицы позволяют инженерам рекомендовать эффективные частоты шаблонировки при разных условиях. Наряду с этим следует отметить, что таблицы типа табл. 6 являются результатами моделирования с физическими допущениями, представленными выше. Поэтому на практике отклонение от их результатов вполне возможно. Однако указанные таблицы являются полезными на стадиях разработки скважин, где ещё нет практических данных, и могут представлять исходную линию, которую далее в процессе бурения можно оптимизировать.

Последним рассмотренным нами вопросом является вопрос о влиянии частиц на перепад поля давления. Для этого результаты моделирования сравнивались с результатами однофазного течения. Некоторые данные такого анализа приведены в табл. 7.

**Таблица 7. Влияние частиц на перепад давления**

**Table 7. Effect of particles on pressure drop**

Жидкость Fluid	Объёмная доля частиц Particles volume concentration, %	Перепад давления относительно случая однородного потока без частиц Pressure drop compared to that of a particle free flow, %
XCD-5	2,88	99,2
$\tau_0=1$	3,75	99,3
$\tau_0=15$	0,21	94,3
$K=0,3$	0,23	90,3
$K=1,4$	1,4	97,2
$n=0,4$	0,28	95,5
$n=0,8$	3,03	99,1

Из этих данных видно, что при течениях с небольшими значениями объёмной доли частиц (меньше 5 %), характерных для практических условий бурения, присутствие частиц может влиять на перепад давления с точностью меньше 10 % (в большинстве случаев меньше 5 %). Учитывая, что при бурении существует ряд других параметров, которые гораздо значительнее влияют на перепад давления (например, изменения диаметра скважины, свойств бурового раствора), изменение перепада давления в результате накопления частиц, скорее всего, не будет проявляться до тех пор, пока их объёмная доля уже не достигнет опасных уровней.

#### Основные выводы

В настоящей работе представлены данные системного анализа и детального моделирования развивающихся по времени и пространству двухфазных течений смесей жидкостей типа ГБ с сферическими одноразмерными частицами. В итоге были получены следующие результаты.

1. С увеличением эксцентричности в нижней части скважины образуется некая мёртвая зона, где скорость потока очень низкая. Частицы пробуренного шлама, попадающие в эту зону, перестают двигаться и накапливаются, образуя слой шлама.
2. Главным механизмом гидротранспорта является зона высокой вязкости, и частицы, находящиеся в этой зоне, двигаются по линиям тока частиц жидкой фазы, в то время как другие частицы попадают в донную область скважины и там накапливаются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling // Drilling and production practice. – New York, American Petroleum Institute, USA, 1941. – P. 91–103.
2. Williams C.E. Jr., Bruce G.H. Carrying capacity of drilling muds // Journal of Petroleum Technology. – 1951. – V. 3. – № 4. – P. 111–120.
3. Hopkin E.A. Factors affecting cuttings removal during rotary drilling // Journal of Petroleum Technology. – 1967. – V. 19. – № 6. – P. 807–814.
4. Zeidler U.H. An experimental analysis of the transport of drilled particles // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1972. – V. 12. – № 1. – P. 39–48.
5. Drill cutting transport in full scale vertical annuli / T.R. Sifferman, G.M. Myers, E.L. Haden, H.A. Wahl // Meeting of the Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mechanical Engineers. – Las Vegas, Nevada, USA, January 1973. – P. 1–12.
6. Thomas R.P., Azar J.J., Becker T.E. Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings behavior in vertical wellbores // Journal of Petroleum Technology. – 1982. – V. 34. – № 9. – P. 1929–1937.
7. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // SPE Drilling Engineering. – 1986. – V. 1. – № 4. – P. 297–308.
8. Transport of cuttings in directional wells / M. Martin, C. Georges, P. Bisson, O. Konirsch // The SPE/IADC Drilling Conference. – New Orleans, Louisiana, 15–18 March, 1987. – P. 1–25.
9. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes / J.T. Ford, J.M. Peden, M.B. Oyeneyin, Erhu Gao, R. Zarrough // The SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 23–26 September, 1990. – P. 1–30.
10. Peden J.M., Ford J.T., Oyeneyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity // The SPE European Petroleum Conference. – Hague, The Netherlands, 1–4 June, 1990. – P. 1–20.

3. Полная очистка скважины от пробуренного шлама невозможна только гидродинамическим способом. В конечном счете придётся проводить механическую очистку после определенного интервала бурения, чтобы избежать возможных технических сложностей.

4. Увеличивая ширину зоны высокой вязкости можно улучшать процесс гидротранспорта и уменьшать частоту механической очистки.

5. Операции уменьшения индексов потока и консистенции, а также увеличения предела текучести способствуют росту размеров зоны высокой вязкости и, следовательно, ведут к интенсификации гидротранспорта. Но рост значений предела текучести сопровождается увеличением перепада давления, поэтому целесообразно сосредоточиться в первую очередь на уменьшении индексов потока и консистенции.

6. Присутствие шлама в кольцевом пространстве влияет на перепад давления, но при небольших концентрациях это влияние мало по сравнению с влиянием других факторов (например, шум при бурении).

7. Моделирование гидродинамических процессов в условиях развивающегося по времени и пространству внутреннего течения реологически сложной вязкой среды является эффективным способом оценки скорости накопления шлама при разных условиях и, следовательно, может служить прогнозом частоты механической очистки на этапе разработки скважин. Также стоит отметить, что построенная модель эффективна в расчетах не только прямоточных, но и закрученных ламинарных и турбулентных течений смесей. В частности, при вращении бурильной трубы определение локальных свойств турбулентности стоит проводить по RSS-к $\omega$ /L модели, в которой расчет напряжений Рейнольдса проводится по соответствующим транспортным уравнениям в отличие от SST-к $\omega$  модели. Кроме того, известно [53, 54], что такие течения анизотропны, поэтому обращение к RSS модели выглядит обоснованным не только в расчетах течений гомогенных, но и гетерогенных сред в скважинах.

6. Thomas R.P., Azar J.J., Becker T.E. Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings behavior in vertical wellbores // Journal of Petroleum Technology. – 1982. – V. 34. – № 9. – P. 1929–1937.
7. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // SPE Drilling Engineering. – 1986. – V. 1. – № 4. – P. 297–308.
8. Transport of cuttings in directional wells / M. Martin, C. Georges, P. Bisson, O. Konirsch // The SPE/IADC Drilling Conference. – New Orleans, Louisiana, 15–18 March, 1987. – P. 1–25.
9. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes / J.T. Ford, J.M. Peden, M.B. Oyeneyin, Erhu Gao, R. Zarrough // The SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 23–26 September, 1990. – P. 1–30.
10. Peden J.M., Ford J.T., Oyeneyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity // The SPE European Petroleum Conference. – Hague, The Netherlands, 1–4 June, 1990. – P. 1–20.

11. Becker T.E., Azar J.J., Okrajni S.S. Correlations of mud rheological properties with cuttings-transport performance in directional drilling // Society of Petroleum Engineers Drilling engineering. – 1991. – V. 6. – № 1. – P. 16–24.
12. Martins A.L., Costapinto S.C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells-A dimensionless approach // SPE Latin America Petroleum Engineering Conference. – Caracas, Venezuela, 1992. – P. 1–7.
13. Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells / D. Mingqin, S.Z. Miska, Mengjiao Yu, N.E. Takach, R.M. Ahmed, C.M. Zettner // SPE Drilling & Completion. – 2009. – V. 24. – № 2. – P. 229–238.
14. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction // Journal of Petroleum Technology. – 1989. – V. 41. – № 9. – P. 916–921.
15. Nguyen Desmond, Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells // SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology. – Kuala Lumpur, Malaysia, 1996. – P. 1–11.
16. Zou Longqin, Patel M.H., Guoyou Han. A new computer package for simulating cuttings transport and predicting hole cleaning in deviated and horizontal wells // International Oil and Gas Conference and Exhibition. – Beijing, China, 2000. – P. 1–12.
17. Simulation of transient cuttings transportation and ECD in wellbore drilling / C.S. Santos, S. Stuckenbruck, S.A.B Fontoura, A.L. Martins // Europec/EAGE Conference and Exhibition. – Rome, Italy, 2008. – P. 1–9.
18. Cho H., Shah S.N., Osisanya S.O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2002. – V. 41. – № 6. – P. 32–39.
19. Sensitivity analysis of major drilling parameters on cuttings transport during drilling highly-inclined wells / E.M. Ozbayoglu, S.Z. Miska, N. Takach, T. Reed // Petroleum science and technology. – 2009. – V. 27. – № 1. – P. 122–133.
20. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores / H.I. Bilgesu, M.W. Ali, K. Aminian, S. Ameri // The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers. – Lexington, Kentucky, USA, October 2002. – 27 p.
21. Mishra Nekkhill. Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells. MSc thesis. – USA, 2007. – 76 p.
22. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus / Han Sang-Mok, Young-Kyu Hwang, Nam-Sub Woo, Young-Ju Kim // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2010. – V. 70. – № 3–4. – P. 308–319.
23. Mme Uduak, P. al Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – V. 6. – № 2. – P. 129–141.
24. Zhu Xiao-hua, Chao Sun, Hua Tong. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well // Journal of Hydrodynamics. – 2013. – V. 25. – № 4. – P. 628–638.
25. Demiralp Yasin. Effects of drill-pipe whirling motion on cuttings transport performance for horizontal drilling. MSc Thesis. – USA, 2014. – 151 p.
26. Ofei Titus N., Shehab A. Alhemyari. Computational fluid dynamics simulation of the effect of drill pipe rotation on cuttings transport in horizontal wellbores using a Newtonian fluid // International Field Exploration and Development Conference. – Beijing, China, 11–12 August, 2015. – P. 1–8.
27. Kamyab Mohammadreza, Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 29. – P. 284–302.
28. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – V. 131. – P. 520–544.
29. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD) // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813.
30. CFD modelling of observed cuttings transport in oil-based and water-based drilling fluids / S. Sneha, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. – Hague, The Netherlands, 2017. – P. 1–12.
31. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 170. – P. 992–1004.
32. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: Effect of particle size polydispersity / E.I. Epelle, O. Winifred, J.A. Okolie, Wilberforce T., D.I. Gerogiorgis // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 208. – № 109795. – P. 1–12.
33. A study on non-spherical cuttings transport in CBM well drilling by coupled CFD-DEM / Shao Bing, Yifei Yan, Xiangzhen Yan, Zhiqian Xu // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2019. – V. 13. – № 1. – P. 579–590.
34. Gulraiz Shiraz, Gray K.E. Study on the combined effect of thixotropy, particle shape, and particle size on cuttings transport in horizontal annuli // Powder Technology. – 2021. – V. 392. – P. 703–716.
35. Effect of orbital motion of drill pipe on the transport of non-Newtonian fluid-cuttings mixture in horizontal drilling annulus / Pang Boxue, Shuyan Wang, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 174. – P. 201–215.
36. Busch A., Stein T.J. Cuttings transport: on the effect of drill pipe rotation and lateral motion on the cuttings bed // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 191. – № 107136. – P. 1–20.
37. Experimental study of cuttings transport with non-Newtonian fluid in an inclined well using visualization and ERT techniques / H.M. Mojammel, S. Imtiaz, S. Zendehboudi, S. Butt, M.A. Rahman, P. Maheshwari // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, 2020. – P. 1–15.
38. Naderi Meysam, Ehsan Khamehchi. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 163. – P. 58–66.
39. Маковей Н. Гидравлика бурения / пер. с рум. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
40. Амзин С.Н. Математическое моделирование движения неинерционных сред в каналах колышевого сечения с учетом диссипации энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2004. – 24 с.
41. Cayeux E., Amare L. Effect of solid particle concentration on drilling fluid rheological behavior and its impact on pressure losses // SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. – Hague, The Netherlands, 2019. – P. 1–39.
42. Mezhericher M., Tamir B., Avi L. Modeling of particle pneumatic conveying using DEM and DPM methods // Particulate Science and Technology. – 2011. – V. 29. – № 2. – P. 197–208.
43. Saffman Ph.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow // Journal of fluid mechanics. – 1965. – V. 22. – № 2. – P. 385–400.
44. Li Amy, Goodarz Ahmadi. Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow // Aerosol science and technology. – 1992. – V. 16. – № 4. – P. 209–226.
45. Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model // An International Journal of Particulate Science and Technology. – 2016. – № 1. – P. 1–31.
46. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
47. FLUENT. Ansys Fluent Users Guide 13. Fluent Incorporated, ANSYS Inc. – Canonsburg, PA, USA, 2010. – 230 p.
48. Харламов С.Н., Джанхорбани М., Филиппов К.А. Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 53–73.
49. Prospects of RANS models with effects multiparameter at modeling of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface / S.N. Kharlamov, V.Yu. Kim, S.I. Silvestrov, R.A. Alginov, S.A. Pavlov // Proc. of the 6<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology. – Heilongjiang, Harbin, China, 2011. – V. 2. – P. 787–791. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021139.

50. Taibi H., Messelmi F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel–Bulkley fluid // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – V. 57. – № 2. – P. 1109–1115.
51. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
52. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment // Turbulence, Heat and Mass Transfer. – 2003. – № 4. – P. 633–640.
53. Харламов С.Н., Фатъянов Д.С. Исследование структуры турбулентного потока природного сырая в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузорно-диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
54. Харламов С.Н., Фатъянов Д.С. Моделирование пространственных течений вязких сред в системе каналов с участками соединений сложной формы // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 70–88.
55. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // Journal of Fluid Mechanics. – 1972. – V. 55. – № 2. – P. 193–208.
56. Busch A. On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids –findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis. PhD Diss. – Norway, 2020. – 187 p.
57. Liu Gefei. Applied well cementing engineering. – Burlington: Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2021. – 621 p.
58. Ahmed R.M., Miska S.Z. Experimental study and modeling of yield power-law fluid flow in annuli with drillpipe rotation // IADC/SPE Drilling Conference. – 2008. – P. 1–18. DOI: 10.2118/112604-ms.
59. Шиченко Р.И., Есьман Б.И., Кондратенко П.И. Гидравлика промывочных жидкостей. – М.: Недра, 1976. – 294 с.
60. Guo Boyun, Gefei Liu. Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. – Burlington: Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2011. – 307 p.
61. Haciislamoglu M. Non-Newtonian fluid flow in eccentric annuli and its application to petroleum engineering problems. PhD Diss. – USA, 1989. – 167 p.
62. Issa Raad I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting // Journal of computational physics. – 1986. – V. 62. – № 1. – P. 40–65.
63. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 150 p.
64. Подрябинкин Е.В. Моделирование течений ньютоновских и неニュтоновских жидкостей в цилиндрическом зазоре: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2014. – 28 с.
65. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Численное исследование вязкостно-инерционного ламинарного закрученного течения в круглой трубе с эксцентрическим круглым ядром // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 7–21.
66. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Процессы транспорта шлама при очистке скважин с произвольной ориентацией буровых труб, содержащих эксцентрически расположенные круглые ядра с подвижной стенкой: проблемы, результаты, перспективы (обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 131–149.
67. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Процедуры и инструментарий мониторинга процессов и механизмов транспорта шлама при гидравлической очистке горизонтальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 22–40.

Поступила 10.07.2022 г.

#### Информация об авторах

**Харламов С.Н.**, профессор, доктор физико-математических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Джанхорбани М.**, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Брыксин М.Р.**, инженер, Филиал общества с ограниченной ответственностью «Газпром инвест Томск».

UDC 504.61:532.542: 536.252

## ON THE ISSUE OF ESTABLISHING THE DURATION OF WELL DRILLING WITHOUT THE DRILL STRING ROTATION

**Sergey N. Kharlamov<sup>1</sup>,**  
kharsn@mail.ru

**Janghorbani Mehran<sup>1</sup>,**  
mehran.janghorbani@gmail.com

**Maxim R. Bryksin<sup>2</sup>,**  
Maxbryksin@mail.ru

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

<sup>2</sup> Branch of Gazprom Invest Tomsk Limited Liability Company,  
39, Lenin avenue, Tomsk, 634034, Russia.

*The relevance of the research is determined by the need for detailed modeling the evolution of viscous mixture dynamic structure, changes in the volumetric concentration of drilled cuttings in the annular annulus of the well, which is constantly accumulated during drilling, as well as monitoring its critical values, leading to problems with the functioning of special equipment.*

*The purpose of the research is the numerical modeling within the framework of computational fluid dynamics (CFD) of cuttings accumulation developing in time and space in internal systems with an eccentric fixed core (pipes, channels) under various conditions of flow of Herschel–Bulkley type drilling fluids, characterized by an arbitrary change in their rheological properties; understanding the features of cuttings accumulation, as well as determining clogging intensity and the time for cleaning wells.*

**Methods** for studying the processes under consideration are based on integrated approach to physical, mathematical and computer modeling of hydrodynamics and convective mass transfer in heterogeneous inhomogeneous continuous media complicated by rheological non-Newtonian effects; combined direct and indirect analysis of the capabilities of the constructed model to predict the essence of cleaning and drilling wells by comparing the simulation results with the available experimental data.

**Results** demonstrate the features of the influence of rheological parameters on cuttings accumulation rate in the annulus and patterns of removal/deposition of particles of drilled rock when changing the flow regimes of the mixture. The possibilities of the method for studying hydraulic transport within the framework of the ANSYS software EL approach using the CFD-DEM model in predicting the pressure drop in the well, the evolution of the dynamic structure of the mixture depending on the intensity of the annulus clutter with cuttings, changes in the average mass velocity at the well inlet in comparison with the available experimental data. The conditions for calculating the maximum recommended drilling time for arbitrary combinations of values of technological and rheological parameters of the drilling fluid are numerically determined and recommended for practice.

### Key words:

Well, horizontal section, annular flows, rheology, drilling, Herschel–Bulkley fluid, modeling, hydrodynamics, mass transfer, transport, treatment.

### REFERENCES

1. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling. *Drilling and production practice*. New York, American Petroleum Institute, USA, 1941. pp. 91–103.
2. Williams C.E. Jr., Bruce G.H. Carrying capacity of drilling muds. *Journal of Petroleum Technology*, 1951, vol. 3, no. 4, pp. 111–120.
3. Hopkin E.A. Factors affecting cuttings removal during rotary drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 1967, vol. 19, no. 6, pp. 807–814.
4. Zeidler U.H. An experimental analysis of the transport of drilled particles. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1972, vol. 12, no. 1, pp. 39–48.
5. Sifferman T.R., Myers G.M., Haden E.L., Wahl H.A. Drill cutting transport in full scale vertical annuli. *Meeting of the Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mechanical Engineers*. Las Vegas, Nevada, USA, January 1973. pp. 1–12.
6. Thomas R.P., Azar J.J., Becker T.E. Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings behavior in vertical wellbores. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, vol. 34, no. 9, pp. 1929–1937.
7. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 4, pp. 297–308.
8. Martin M., Georges C., Bisson P., Konirsch O. Transport of cuttings in directional wells. *SPE/IADC Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, March 15–18, 1987. pp. 1–25.
9. Ford J.T., Peden J.M., Oyeneyin M.B., Erhu Gao, Zarrough R. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. *SPE annual technical conference and exhibition*. New Orleans, Louisiana, Society of Petroleum Engineers, 23–26 September, 1990. pp. 1–30.
10. Peden J.M., Ford J.T., Oyeneyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity. *European Petroleum Conference*. Hague, The Netherlands, 1–4 June, 1990. pp. 1–20.
11. Becker T.E., Azar J.J., Okrajni S.S. Correlations of mud rheological properties with cuttings-transport performance in directional drilling. *Society of Petroleum Engineers Drilling engineering*, 1991, vol. 6, no. 1, pp. 16–24.
12. Martins A.L., Costapinto Santana C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells-A dimensionless approach. *SPE Latin America Petroleum Engineering Conference*. Caracas, Venezuela, 1992. pp. 1–7.
13. Mingqin D., Miska S.Z., Mengjiao Yu, Takach N.E., Ahmed R.M., Zettner C.M. Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells. *SPE Drilling & Completion*, 2009, vol. 24, no. 02, pp. 229–238.
14. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction. *Journal of Petroleum Technology*, 1989, vol. 41, no. 09, pp. 916–921.
15. Nguyen Desmond, Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly

- deviated and horizontal wells. *SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology*. Kuala Lumpur, Malaysia, 1996. pp. 1–11.
16. Zou Longqing, Patel M.H., Guoyou Han. A new computer package for simulating cuttings transport and predicting hole cleaning in deviated and horizontal wells. *International Oil and Gas Conference and Exhibition*. Beijing, China, 2000. pp. 1–12.
  17. Santos C.S., Stuckenbruck S., Fontoura S.A.B., Martins A.L. "Simulation of transient cuttings transportation and ECD in wellbore drilling. *Europet/EAGE Conference and Exhibition*. Rome, Italy, 2008. pp. 1–9.
  18. Cho H., Shah S.N., Osisanya S.O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2002, vol. 41, no. 06, pp. 32–39.
  19. Ozbayoglu E.M., Miska S.Z., Takach N., Reed T. Sensitivity analysis of major drilling parameters on cuttings transport during drilling highly-inclined wells. *Petroleum science and technology*, 2009, vol. 27, no. 1, pp. 122–133.
  20. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores. *The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers*. Lexington, Kentucky, USA, October 2002. 27 p.
  21. Mishra Nekkhal. *Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells*. MSc thesis. USA, 2007. 76 p.
  22. Han Sang-Mok, Young-Kyu Hwang, Nam-Sub Woo, Young-Ju Kim. Solid–liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, no. 3–4, pp. 308–319.
  23. Mme Uduak, Al Skalle P. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles. *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 129–141.
  24. Zhu Xiao-hua, Chao Sun, Hua Tong. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well. *Journal of Hydrodynamic*, 2013, vol. 25, no. 4, pp. 628–638.
  25. Demiralp Yasin. *Effects of drill-pipe whirling motion on cuttings transport performance for horizontal drilling*. MSc Thesis. USA, 2014. 151 p.
  26. Ofei T.N., Shehab A.A. Computational fluid dynamics simulation of the effect of drill pipe rotation on cuttings transport in horizontal wellbores using a Newtonian fluid. *International Field Exploration and Development Conference*. Beijing, China, 11–12 August, 2015. pp. 1–8.
  27. Kamyab Mohammadreza, Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 29, pp. 284–302.
  28. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 131, pp. 520–544.
  29. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 801–813.
  30. Sneha S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. CFD Modelling of observed cuttings transport in oil-based and water-based drilling fluids. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Hague, The Netherlands, 2017. pp. 1–12.
  31. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 992–1004.
  32. Epelle E.I., Obande W., Okolie J.A., Wilberforce T., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: Effect of particle size polydispersity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, no. 109795, pp. 1–12.
  33. Shao Bing, Yifei Yan, Xiangzhen Yan, Zhiqian Xu. A study on non-spherical cuttings transport in CBM well drilling by coupled CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 579–590.
  34. Gulraiz Shiraz, Gray K.E. Study on the combined effect of thixotropy, particle shape, and particle size on cuttings transport in horizontal annuli. *Powder Technology*, 2021, vol. 392, pp. 703–716.
  35. Pang Boxue, Shuyan Wang, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu. Effect of orbital motion of drill pipe on the transport of non-Newtonian fluid-cuttings mixture in horizontal drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 201–215.
  36. Busch A., Stein T.J. Cuttings transport: on the effect of drill pipe rotation and lateral motion on the cuttings bed. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 191, no. 107136, pp. 1–20.
  37. Mojammel H.M., Imtiaz S., Zendehboudi S., Butt S., Rahman M.A., Maheshwari P. Experimental study of cuttings transport with non-Newtonian fluid in an inclined well using visualization and ERT techniques. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, 2020. pp. 1–15.
  38. Naderi Meysam, Ehsan Khamehchi. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 58–66.
  39. Makovei N. *Gidravlika burenija* [Drilling hydraulics]. Translated from Romanian. Moscow, Nedra Publ., 1986. 536 p.
  40. Amzin S.N. *Matematicheskoe modelirovaniye dvizheniya nenyutonovskikh sred v kanalakh koltsevogo secheniya s uchetom dissipatsii energii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Mathematical modeling of the movement of non-Newtonian media in the channels of the annular section, taking into account the dissipation of energy. Cand. Diss. Abstract]. Voronezh, 2004. 24 p.
  41. Cayeux E., Leulsegeld A. Effect of solid particle concentration on drilling fluid rheological behavior and its impact on pressure losses. *SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition*. Hague, The Netherlands, 2019. pp. 1–39.
  42. Mezhericher M., Tamir B., Avi L. Modeling of particle pneumatic conveying using DEM and DPM methods. *Particulate Science and Technology*, 2011, vol. 29, no. 2, pp. 197–208.
  43. Saffman P.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow. *Journal of fluid mechanics*, 1965, vol. 22, no. 2, pp. 385–400.
  44. Li Amy, Goodarz Ahmadi. Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow. *Aerosol science and technology*, 1992, vol. 16, no. 4, pp. 209–226.
  45. Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model. *An International Journal of Particulate Science and Technology*, 2016, no. 01, pp. 1–31.
  46. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. 1, 464 p.
  47. FLUENT. *Ansys Fluent Users Guide 13*. Fluent Incorporated, ANSYS Inc. Canonsburg, PA, USA. 2010. 230 p.
  48. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Filippov K.A. Mathematical modeling and research methods of horizontal wells hydrodynamic cleaning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 53–73. In Rus.
  49. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Harbin, China, August 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
  50. Taibi H., Messelmi F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel–Bulkley fluid. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 1109–1115.
  51. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 08, pp. 1598–1605.
  52. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, no. 04, pp. 633–640.
  53. Kharlamov S.N., Fatyjanov D.S. Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53–67. In Rus.
  54. Kharlamov S.N., Fatyjanov D.S. Simulation of viscous media spatial flows in the system of channels with sections of complex form junctions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 70–88. In Rus.

55. Morsi S.A., Alexander A.J. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, vol. 55, no. 2, pp. 193–208.
56. Busch A. *On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids –findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis*. PhD Diss. Norway, 2020. 187 p.
57. Liu Gefei. *Applied well cementing engineering*. Burlington, Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2021. 621 p.
58. Ahmed R.M., Miska S.Z. Experimental study and modeling of yield power-law fluid flow in annuli with drillpipe rotation. *IADC/SPE Drilling Conference*, 2008, pp. 1–18. DOI: 10.2118/112604-ms.
59. Shichenko R.I., Esman B.I., Kondratenko P.I. *Gidravlika promivochnykh zchidkostey* [Hydraulics of washing liquids]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 294 p.
60. Guo Boyun, Gefei Liu. *Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models*. Burlington, Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2011. 307 p.
61. Haciislamoglu M. *Non-Newtonian fluid flow in eccentric annuli and its application to petroleum engineering problems*. PhD Diss. USA, 1989. 167 p.
62. Issa Raad I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of computational physics*, 1986, vol. 62, no. 1, pp. 40–65.
63. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York, McGraw-Hill, 1980. 150 p.
64. Podryabinkin E.V. *Modelirovaniye tcheniy nytovskikh i nenytonovskikh zchidkostey v tshilindricheskem zazore*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Simulate flows of Newtonian and non-Newtonian fluids in a cylindrical gap. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2014. 28 p.
65. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical simulation of viscous – inertial laminar swirling flow in a circular tube with an eccentric round core. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7–21. In Rus.
66. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Cuttings transport in hole cleaning considering well orientation, pipe eccentricity and pipe rotation: problems, results, prospects (survey). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no 7, pp. 131–149. In Rus.
67. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Procedures and instruments for monitoring processes and mechanisms of cutting transport in hydraulic cleaning of horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 22–40. In Rus.

Received: 10 July 2022.

#### Information about the authors

- Sergey N. Kharlamov**, professor, Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Janghorbani Mehran**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Maxim R. Bryksin**, engineer, Branch of Gazprom Invest Tomsk Limited Liability Company.

УДК 622.457.2

## ЭЖЕКТИРОВАНИЕ ВОЗВРАТНОГО ПОТОКА ВОЗДУХА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОБОЙНОСТИ НАПРАВЛЕННОЙ В ТУПИК ВОЗДУШНОЙ СТРУИ

Казаков Борис Петрович<sup>1</sup>,  
aero\_kaz@mail.ru

Шалимов Андрей Владимирович<sup>1</sup>,  
shalimovav@mail.ru

Гришин Евгений Леонидович<sup>1</sup>,  
aeroevg@mail.ru

<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН,  
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью развития ресурсосберегающих технологий нагнетательного проветривания тупиковых горных выработок, связанных с обеспечением сохранности воздухопроводов во время проведения взрывных работ. Решение проблемы заключается в разработке технических решений, позволяющих убрать конец воздухопровода из зоны поражающего действия разлетающихся осколков горной породы, отодвинув его от груди забоя на безопасное расстояние без нарушения требований правил безопасности.

**Цель:** разработка ресурсосберегающего способа проветривания тупиковых выработок нагнетанием, связанного с использованием кинетической энергии воздушной струи для подсоса возвратного потока воздуха в камеру смешения с ожидаемым эффектом увеличения расстояния проветривания.

**Объекты:** тупиковые выработки.

**Методы:** аналитическое и численное моделирование процессов эжекции воздуха и распространения стеснённой настилающейся воздушной струи, направленной в тупик; сравнительный анализ экспериментальных и модельных данных.

**Результаты.** Проведён анализ экспериментальных данных по проветриванию тупиковых выработок нагнетательным способом с отставанием конца трубопровода от груди забоя. Отмечено, что полученные различными исследователями экспериментальные зависимости для определения дальности вентиляционной струи не позволяют сделать однозначный вывод о допустимом расстоянии отставания ввиду слишком большого разброса значений коэффициента пропорциональности между ним и поперечным размером выработки. Установлено, что причиной разброса является пренебрежение зависимостью дальности струи от её начальной скорости и расхода, которая тем менее ярко выражена, чем менее стеснённой является струя. Рассмотрена возможность увеличения стеснения и расхода струи путём эжекционного подсоса возвратного потока воздуха в установленную перед концом трубопровода камеру смешения. Представлена аналитическая модель работы эжекторной установки с проницаемой перемычкой, по результатам которой сделана оценка увеличения расхода струи за счёт рециркуляции. Несмотря на небольшое значение коэффициента эжекции численное моделирование процесса показало неожиданно большое увеличение дальности проветривания при возрастании начальной скорости струи в реальном диапазоне, и требуемый результат отставания трубопровода в 50 м был достигнут. Показано, что предложенный ресурсосберегающий способ нагнетательного проветривания тупиковых выработок требует проведения предварительной процедуры подбора и оптимизации геометрических размеров трубопровода, камеры смешения и расхода воздуха, т. к. при численном моделировании наблюдается как недостаточная глубина проветривания, так и потеря устойчивости с развалом единого циркуляционного вихря при чрезмерно интенсивном движении воздуха.

**Ключевые слова:**

Трубопровод, ударная волна, камера смешения, вентилятор местного проветривания, эжекционный эффект, аэродинамическое сопротивление, неустойчивость, стеснённая настилающаяся струя.

### Введение

Нагнетательный способ проветривания тупиковых выработок имеет наибольшее распространение на горнодобывающих предприятиях, а на газовых шахтах является обязательным и единственным [1]. Его отличительная особенность в сравнении со всасывающим способом состоит в том, что призабойное пространство проветривается струей свежего воздуха, выходящего из трубопровода с большой скоростью, что позволяет размещать его на удалении от груди забоя. В соответствии с требованиями Единых правил безопасности [2] и действующего «Технологического регламента (специальных мероприятий)…» [3] отставание става вентиляционных труб от забоя тупиковой выработки при любом способе её проветривания не должно превышать 10 м. При буровзрывном способе

проходки выработок выполнение этого требования сопряжено со значительными трудностями в связи с невозможностью сохранения целостности и работоспособности конечных участков вентиляционных труб, подвергающихся разрушительному действию ударной волны и разлетающихся кусков взорванной горной массы при производстве взрывов. Негативными последствиями взрыва являются нарушение целостности трубопровода и необходимость замены его концевой части протяжённостью до 20–30 м. Восстановление повреждённых вентиляционных рукавов после каждого взрыва приводит к значительному росту трудоёмкости работ и снижению показателей проходки, в том числе и безопасности горных работ в связи с увеличением времени простоя незакреплённых, свежеобнажённых взрывом участков, поскольку

доступ к ним горнорабочих становится возможным только после проветривания забоя.

Из результатов опытных и теоретических исследований [4–10] следует, что отмеченное требование правил безопасности на ограничение расстояния отставания става вентиляционных труб от забоя не всегда является обоснованным и в зависимости от условий может быть ослаблено в сторону увеличения расстояния без нарушения нормального проветривания. Поэтому определение величины этого расстояния в зависимости от конкретных условий проветривания тупиковой выработки даёт возможность получения оптимального решения в смысле достижения компромисса между безопасным и ресурсосберегающим проветриванием [11].

Специалистами ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» неоднократно испытывались различные варианты организации проходки и проветривания тупиковых выработок с целью поиска оптимальных условий, обеспечивающих возможность эффективного проветривания забоев после взрывных работ без последующего трудоёмкого восстановления разрушенных взрывом участков става вентиляционных труб. На руднике «Октябрьский» были проведены опытно-промышленные испытания (ОПИ) по проветриванию тупиковых выработок после взрывных работ без использования сжатого воздуха [12], которые проводились в четырех тупиковых выработках, проводимых по богатым, медистым и вкрашенным рудам. Отставание вентиляционных труб в опытных забоях варьировалось от 10 до 28 м по критерию минимально допустимой скорости движения воздуха у груди забоя. Целью проведения ОПИ являлось определение технической возможности проветривания тупиковых горных выработок в процессе их проходки только вентиляторами местного проветривания (ВМП) с соблюдением всех требований промышленной безопасности, предусмотренных регламентирующими документами. К сожалению, ожидаемый положительный эффект снижения разрушающего воздействия взрывов на конечные участки вентиляционных труб получен не был. Фактические разлеты кусков взорванной горной массы составили в среднем 19–30 м, а отдельных кусков – до 50 м. При этом было отмечено, что наибольшие разлеты имели место в выработках, проводимых по медистым рудам, наименьшие – по богатым и вкрашенным рудам. Вкупе с ударной волной это привело к значительным повреждениям вентиляционных труб, т. е. отставание их от забоя в данных условиях оказалось меньше размера зоны поражения осколками породы.

#### **Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования распространения воздушных струй, направленных в тупик**

Экспериментальные исследования воздушных струй, направленных в тупик, были проведены большим количеством исследователей в широком диапазоне параметров стеснения [4–10]. Было установлено, что турбулентные струи, образующиеся в ограниченном пространстве, по основным кинематическим и

динамическим свойствам значительно отличаются от турбулентных струй, распространяющихся в неограниченном пространстве. В процессе захвата струей воздуха из окружающего пространства происходит торможение струи и уменьшение количества ее движения. Анализ физической картины взаимодействия встречных потоков показывает, что на дальность струи основное влияние оказывает характер ее стеснения, а остальные факторы являются менее значимыми [13].

Проведенные измерения по установлению дальности струи на Оленегорском подземном руднике ОАО «ОЛКОН» и на подземном руднике горнодобывающего комбината «Олений ручей» Северно-Западной Фосфорной Компании показали, что средневзвешенное значение дальности струи составляет для первого рудника  $L=8,45 \sqrt{S}$ , для второго –  $L=7,79 \sqrt{S}$  м. Поскольку на обоих рудниках имеются отклонения от среднего значения как в большую, так и в меньшую стороны, с учетом коэффициента запаса 1,3 было принято максимальное значение отставания трубопровода от груди забоя

$$L=k \sqrt{S}, \text{ м}, \quad (1)$$

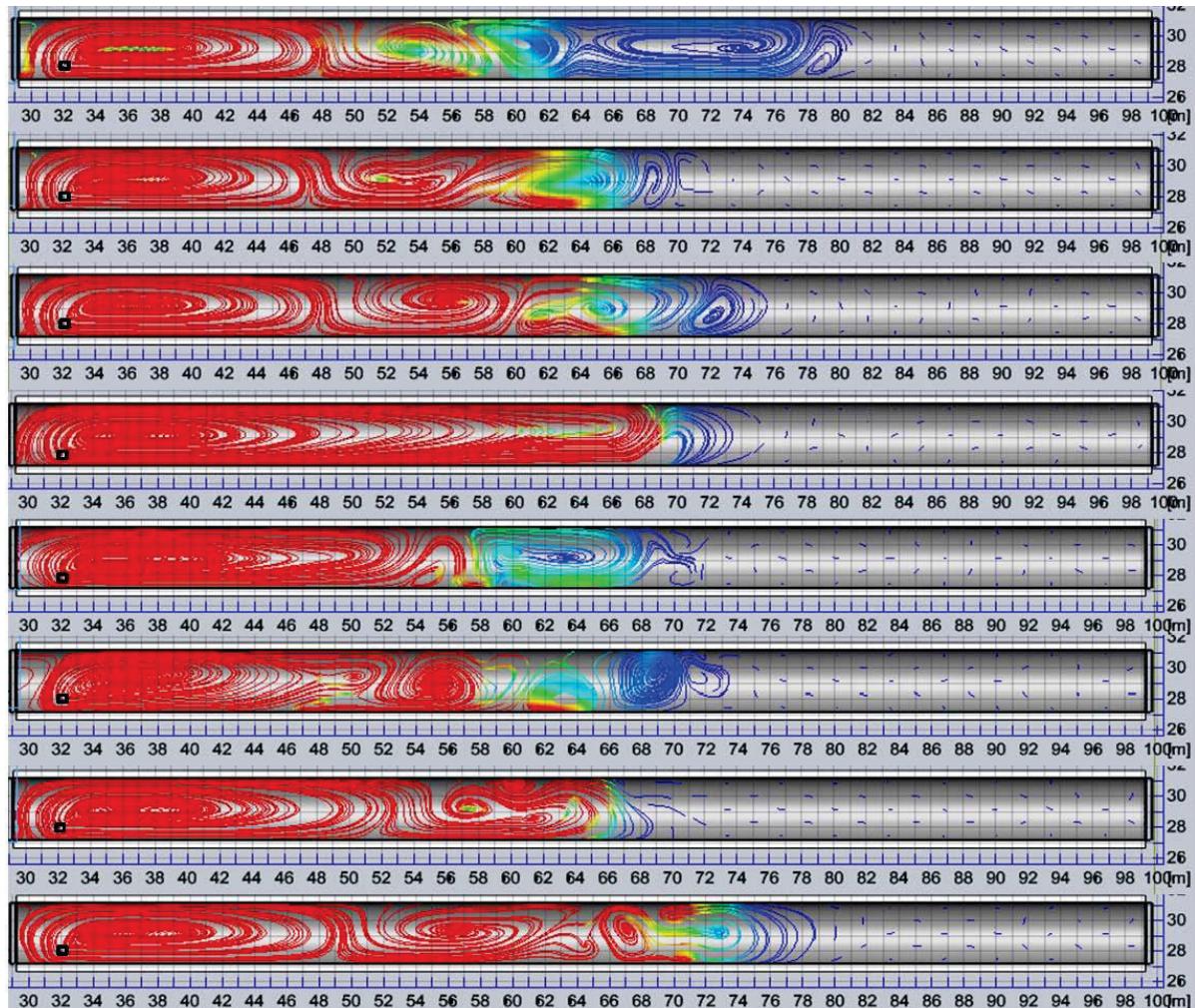
где  $k=6,5$ . Полученный результат не является общепризнанным. В литературе по вентиляции встречаются как другие величины коэффициентов при  $\sqrt{S}$ , так и другие типы зависимостей [14]. Следует учесть также, что и само понятие дальности струи является условным, т. к. распад струи не происходит мгновенно, и расстояние, на котором струю следует считать иссякшей, не является строго определенным.

Горным институтом КНЦ РАН на предприятиях ОАО «Апатит» экспериментальным путем определялась дальность струи воздуха, подаваемого по вентиляционным трубам в забои различных сечений горных выработок [15]. Максимальное значение длины струи определялось по замерам скорости воздуха, превышающей величину 0,25 м/с, выбор которого был обусловлен необходимостью точной фиксации остаточного движения воздуха в направлении забоя, не вызванного инструментальной погрешностью измерений, которая составляет  $\sim 0,1$  м/с. Соответственно за границу распространения струи принята наиболее удаленная в сторону груди забоя точка, устойчивая скорость струи в которой составляла не менее 0,25 м/с. Экспериментальное определение дальности струи в разных тупиковых выработках по данному критерию показало, что величины коэффициента  $k$  в (1) лежат в широком диапазоне значений от 3 до 9, что не позволяет сделать однозначную оценку допустимого отставания воздухопровода в общем случае с приемлемой точностью. Причиной столь большой разницы в определении дальности струи, очевидно, является слишком упрощенный вид её зависимости только от сечения выработки (1), не учитываяший другие факторы.

Результаты численного моделирования распространения воздушной струи, направленной в тупик, при увеличении скорости истечения воздуха показали

[16], что её дальность увеличивается в значительной степени, чтобы не принимать во внимание зависимость от скорости. В выработке с поперечным размером 4 м, проветриваемой вентилятором ВМЭ-12А (диаметр 1,2 м), при увеличении скорости струи с 5 до 80 м/с её дальность увеличилась с 12 до 56 м, что, в соответствии с экспериментальными данными по определению величины поражающего

действия разлетающихся при взрыве осколков, решает проблему сохранности трубопровода. Однако следует отметить, что в соответствии с техническими характеристиками вентилятора ВМЭ-12А скорость выхода воздушной струи из него без её искусственного сужения не превышает 30 м/с, что соответствует дальности ~30 м, а этого недостаточно для решения отмеченной проблемы.



**Рис. 1.** Результаты численного моделирования распространения стеснённой настилающейся струи в тупик при разных значениях начальной скорости движения воздуха: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 м/с по возрастанию сверху вниз. Красным цветом отмечены траектории движения воздуха со скоростью не меньшей 0,25 м/с. Поперечный размер выработки – 4 м, диаметр струи из воздухопровода – 0,5 м

**Fig. 1.** Results of numerical simulation of the propagation of a constrained laying jet into a dead end at different values of the initial velocity of air movement: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80 m/s ascending from top to bottom. The trajectories of air movement at a speed of at least 0,25 m/s are marked in red. The transverse size of the output is 4 m, the diameter of the jet from the air line is 0,5 m

Было проведено численное моделирование в программном комплексе SolidWorks, которое показало, что использование воздухопровода меньшего диаметра или конфузора, увеличивающего скорость с уменьшением расхода, только ухудшает проветривание. Оказалось, что уменьшение сечения струи сокращает дальность её распространения сильнее, чем увеличение скорости истечения потока. При установке конфузора с выходным диаметром 0,5 м и уменьшении степени стеснения струи зависимость её даль-

нобойности от начальной скорости практически исчезает (рис. 1) со значением  $k \sim 6,5-9$ . В семи из восьми вариантов скоростей наблюдается распад циркуляции воздуха на два и более частично локализованных вихря, и только при начальной скорости воздушной струи  $\sim 40$  м/с образуется целостный вихрь протяжённостью  $\sim 37$  м. Этот результат подтверждает сделанное предположение о том, что пренебрежение зависимостью дальности воздушной струи от начальной скорости в общем случае применительно к

произвольным условиям проветривания тупиковых выработок корректным не является. При увеличении стеснения струи, как было установлено в [16], такая зависимость появляется, что наводит на мысль о целесообразности использования камеры смешения для подсоса возвратного потока воздуха, инициирующей появление вторичной эжекционной струи большего сечения и с большим расходом.

#### Аналитическая модель работы эжекторной установки с камерой смешения без перемычки

Из практики использования ВМП для улучшения вентиляции горных выработок следует, что при малых аэродинамических сопротивлениях участков проветривания выгоднее применять вентилятор-эжектор, преобразующий энергию вентиляционной струи в эжекционный напор, в то время как у обычного установленного в перемычке вентилятора энергия струи расходуется без пользы. В зависимости от величины аэродинамического сопротивления участка проветривания эжекционный напор может быть увеличен камерой смешения, ограничивающей сечение раскрытия воздушной струи [17]. Камера смешения, как правило, устанавливается в перемычке, чтобы исключить утечки воздуха. Однако при проветривании выработок большого сечения [18], в которых сооружение перемычки проблематично или нецелесообразно, установка камеры смешения перед вентилятором-эжектором также может иметь положительное действие и даже вызывать эффект вторичной эжекции.

На первый взгляд может показаться, что эжекционный эффект никакого полезного действия для проветривания тупиковой выработки иметь не может.

Тем не менее такие примеры есть. В работе [19] в качестве одного из вариантов беструбного проветривания тупиковых выработок рассмотрена возможность и дана количественная оценка эффекта от установки в выработке продольной перегородки, за счёт которой инициируется эжекционный подсос воздуха из примыкающей сквозной выработки. Для нагнетательного способа проветривания, если учесть установленный факт зависимости дальности воздушной струи от скорости её истечения при фиксированном сечении, ограничение площади её раскрытия установкой перед ней камеры смешения без перемычки должно увеличить расход воздуха за счёт подсоса возвратного потока. Полезное действие эффекта в данном случае не очевидно, т. к. расход увеличивается на фоне увеличения сечения струи и падения её скорости в камере смешения. Однако с учётом малой величины аэродинамического сопротивления выхода потока из камеры и его разворота эффект может быть положительным по причине ожидаемо высокого значения коэффициента эжекции (отношение исходящего из камеры смешения расхода воздуха к дебиту струи). В представленной ниже математической модели эжекции воздуха в камере смешения эти сопротивления включены в сопротивление проницаемой перемычки  $r$ , в которой установлена камера. При этом для совместимости с моделью [17] и возможности использования полученных в ней зависимостей рассматривается более общий вариант конечного сопротивления проветриваемой выработки  $R$ . Затем, как частный случай, применительно к проветриванию тупиковой выработки  $R$  полагается равным бесконечности, а  $r$  применительно к отсутствию перемычки – сопротивлению выхода потока из камеры смешения.

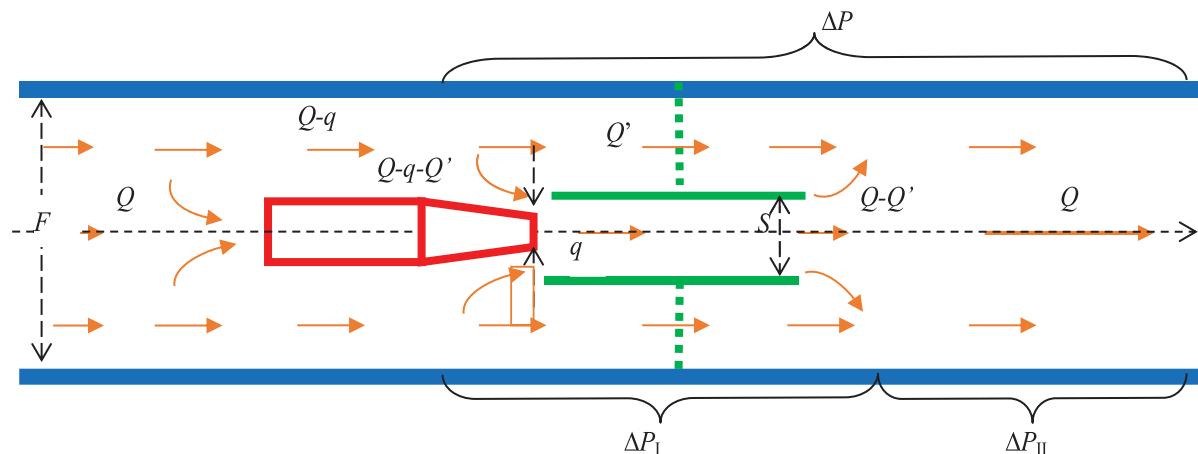


Рис. 2. Схема распределения воздушных потоков в горной выработке при эжектировании воздуха в камеру смешения, установленную в воздухопроницаемой перемычке

Fig. 2. Scheme of distribution of air flows in the mining during air ejection into the mixing chamber installed in an air-permeable jumper

Общий поток воздуха  $Q$  по выработке вблизи всаса вентилятора разделяется на два потока:  $q$  и  $Q-q$  (рис. 2). Для непроницаемой перемычки  $Q-q$  является эжектируемым потоком для эжектирующего потока  $q$ . Если перемычка камеры смешения проницаема, то эжектируемый поток может быть как меньше, так и

больше  $Q-q$ . Пусть  $Q'$  – расход воздуха через перемычку, причём для единобразия за положительное направление движения воздуха выбрано направление струи вентилятора, т. е. эжектируемый поток в данном случае есть  $Q-q-Q'$ . Знак  $Q'$ , вообще говоря, не очевиден, но применительно к проветриванию тупи-

ковой выработки можно заключить однозначно, что  $Q'<0$ . Ситуация  $Q'>0$  означает возможность возникновения вторичной эжекции, которая может иметь место лишь в условиях сквозного проветривания. Таким образом, по рисунку эжекционные напоры  $\Delta P_{II}=0$  и  $\Delta P=\Delta P_I$ .

При непроницаемой перемычке камеры смешения для определения напора эжекторной установки может быть использована зависимость  $\Delta P=Y(Q)$ , полученная в [17]:

$$\Delta P = \frac{Q^2}{\rho} \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{F} \right) \times \begin{cases} \frac{1}{F}, Q \geq 0 & -\frac{(Q-q)^2}{\rho} \left( \frac{1}{S-f} - \frac{1}{F-f} \right) \times \\ \frac{1}{S}, Q < 0 & \\ \frac{1}{(S-f)}, (Q-q) \geq 0 & + \frac{1}{\rho S} \left[ \frac{(Q-q)^2}{S-f} + \frac{q^2}{f} - \frac{Q^2}{S} \right], \\ \frac{1}{(F-f)}, (Q-q) < 0 & \end{cases} \quad (2)$$

где  $F$  – сечение выработки;  $S$  – сечение камеры смешения;  $f$  – сечение струи;  $\rho$  – плотность воздуха. Используемые единицы измерения физических величин: массовые расходы – кг/с, сечения – м<sup>2</sup>, давления – Па, плотность – кг/м<sup>3</sup>, сопротивление – Па/(кг/с)<sup>2</sup>.

В случае проницаемой перемычки расход воздуха по выработке –  $Q$ , а через камеру смешения –  $Q-Q'$ . Поскольку возникновение эжекционного напора происходит внутри камеры смешения, то и определяющим эжекцию расходом является  $Q-Q'$ , т. е.  $\Delta P=Y(Q-Q')$ . Сопротивление перемычки камеры смешения  $r$  можно рассматривать как сопротивление, параллельное сопротивлению проветриваемого участка  $R$ , на который работает эжекторная установка, т. е.  $\Delta P$  является причиной возникновения движения воздуха  $Q'$  через

перемычку  $r$ , а, значит,  $|Q'| = \sqrt{\frac{|\Delta P|}{r}}$ . Относительно

знаков следует сказать, что  $Q'>0$  при  $\Delta P<0$ , и наоборот, что  $Q'<0$  при  $\Delta P>0$ . Таким образом, получается уравнение для определения эжекционного напора  $\Delta P$  как функции общего расхода воздуха по выработке  $Q$ :

$$\Delta P = Y \left( Q + \sqrt{\frac{|\Delta P|}{r}} \operatorname{sign}(\Delta P) \right), \quad (3)$$

где  $Y$  – функция, описанная уравнением (2) ( $\Delta P=Y(Q)$ );  $\operatorname{sign}(\Delta P)$  – знак  $\Delta P$ . Уравнение (3) является нелинейным относительно  $\Delta P$  и должно решаться численно. Очевидно, что (2) является частным случаем (3) при  $r \rightarrow \infty$ , т. е. при герметичной перемычке.

Случай  $r=0$  также не лишён смысла, поскольку на практике иногда используется камера смешения без перемычки. Её отсутствие не означает, что сопротивление рециркуляции воздуха вокруг камеры смешения равно нулю, т. к. имеют место потери энергии на поворот потока и на его сужение и расширение. На практике камера смешения значительно меньше выработки по сечению ( $S \ll F$ ), поэтому при отсутствии перемычки основным аэродинамическим сопротив-

лением замыкания потока является его сужение и расширение при входе и выходе из камеры смешения. Сечение потока на входе и выходе из камеры смешения –  $S$  (предположительно  $f \ll S$ ), а при прохождении между камерой смешения и стенками выработки –  $F-S$ . Предполагая сопротивление сужения равным сопротивлению аналогичного расширения и используя для его определения теорему Борда [20], можно оценить общее сопротивление разворота  $r'$  с учётом сужения-расширения потока воздуха при её прохождении:

$$r' = r + \frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{F-S} - \frac{1}{S} \right)^2. \quad (4)$$

В таблице представлены результаты расчёта скорости движения воздуха  $v_Q$  (м/с) на выходе из камеры смешения эжекторной установки диаметром 1,2 м с вентилятором ВМЭ-12А с конфузором диаметром 0,5 м в зависимости от скорости  $v_q$  (м/с) исходящей из него струи воздуха ( $v'_Q$  (м/с) – по результатам численного моделирования с диапазоном изменения скорости воздуха по сечению потока на выходе из камеры смешения). Как следует из таблицы, величина коэффициента эжекции оказывается невелика ~1,8, и на фоне увеличения расхода скорость движения воздуха на выходе из камеры смешения уменьшается более чем в 3 раза по сравнению с начальной. Исходя из того, как было установлено в [16], что необходимая дальность распространения воздушной струи в 50 м достигалась лишь при скорости воздушной струи из трубопровода того же диаметра (1,2 м) в 80 м/с, полезное действие эжекционного эффекта в данном случае представляется сомнительным.

**Таблица.** Значения скоростей движения воздуха на выходе из камеры смешения без перемычки ( $r=0$ ) в зависимости от скорости эжектирующей струи  $v_q$ , полученные по результатам аналитического  $v_Q$  (2)–(4) и численного моделирования  $v_Q'$

**Table.** Values of air velocity at the outlet of the mixing chamber without jumper ( $r=0$ ), depending on the velocity of the ejecting jet  $v_q$ , obtained from the results of analytical  $v_Q$  (2)–(4) and numerical simulation  $v_Q'$

$v_q$ (м/с) (м/с)	10	20	30	40	50	60	70	80
$v_Q$ (м/с) (м/с)	3,2	6,4	9,6	12,8	15,9	19,0	22,1	25,2
$v'_Q$ (м/с) (м/с)	2–8	4–13	7–18	9–23	11–28	14–34	16–39	18–45

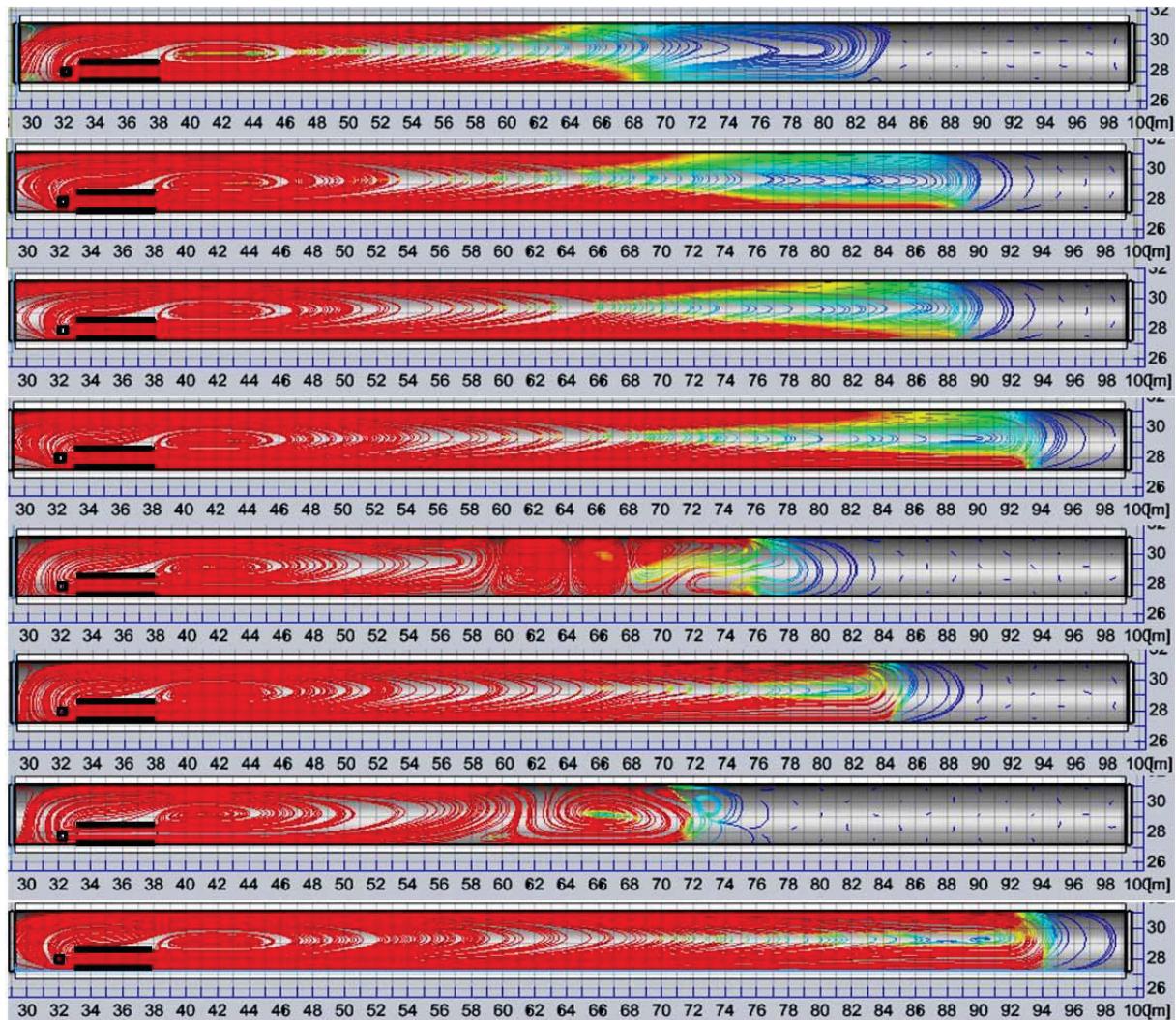
Однако, как показано по результатам численного моделирования (рис. 3), динамика распространения воздушной струи из трубопровода и камеры смешения того же диаметра сильно отличается в пользу второго варианта.

#### Численное моделирование увеличения дальности струи за счёт эжекции

Численное моделирование дальности струи с эжекционным раскрытием её в камере смешения было проведено в программном комплексе Solidworks.

Положительный эффект ожидался от установки камеры смешения диаметром 1,2 м перед конфузором воздухопровода диаметром 0,5 м в виде устойчивого возрастания дальности распространения струи с ростом её начальной скорости и выходом дальности за пределы зоны поражения осколками породы при взрыве (~50 м) при реальных значениях начальной скорости. Представленные выше результаты численного моделирования показали (рис. 1), что дальность струи при её поперечном размере 0,5 м от её начальной скорости зависит слабо без явно выра-

женной тенденции к возрастанию, а при поперечном размере 1,2 м [16] требуемый результат достигался лишь при «запредельном» значении скорости струи в 80 м/с (расход 96 м<sup>3</sup>/с), более чем в 2 раза превышающем технические возможности вентилятора ВМЭ-12А. С добавлением камеры смешения численное моделирование дало неожиданный результат – расстояние проветривания с увеличением дебита вентилятора ожидаемо возрастало, но значительно сильнее, чем при проветривании воздушной струёй непосредственно из трубопровода такого же сечения (рис. 3).



**Рис. 3.** Результаты численного моделирования распространения стеснённой настилающейся струи в тупик с эжектированием возвратного потока воздуха в камеру смешения при разных значениях начальных скоростей движения воздуха: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 м/с по возрастанию сверху вниз. Красным цветом отмечены траектории движения воздуха со скоростью не меньшей 0,25 м/с. Поперечный размер выработки – 4 м, диаметр камеры смешения – 1,2 м, диаметр конфузора трубопровода – 0,5 м

**Fig. 3.** Results of numerical simulation of a constrained laying jet propagation into a dead end with ejection of the return air flow into the mixing chamber at different values of the initial air velocities: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80 m/s ascending from top to bottom. The trajectories of air movement at a speed of at least 0,25 m/s are marked in red. The transverse size of the work out is 4 m, the diameter of the mixing chamber is 1,2 m, the diameter of the confuser of the pipeline is 0,5 m

Требуемый результат в 50 м был достигнут уже при дебите вентилятора 8 м<sup>3</sup>/с (40 м/с), при этом скорость выхода воздуха из камеры смешения составляла всего лишь ~13 м/с. Причиной возникновения подоб-

ного неожиданно сильного положительного эффекта от использования камеры смешения является конфигурация течения на границе встречных потоков вблизи выходного сечения камеры смешения. При отсут-

ствии камеры в месте выхода воздушной струи из воздухопровода происходит наиболее сильная потеря её кинетической энергии в результате столкновения со встречным потоком. Во втором случае, как следует из рисунка, в месте выхода образуется пограничный «буферный» вихрь, подобно шарниру, сглаживающий взаимодействие встречных потоков и позволяющий без потерь воздушной струе из камеры пройти наиболее энергозатратный участок. Причинами образования «полезного» вихря, очевидно, являются сильная неравномерность скорости воздуха по сечению струи, как отмечено в таблице, её несимметричность со смещением в сторону настилания, а также эжекционный подсос воздуха в камеру смешения, также оказывающий благоприятное воздействие на эжектирование возвратного потока с минимальным потерями энергии от его столкновения с исходящей струёй. Следует отметить также, что при дальнейшем увеличении скорости струи до 50 м/с в результате возникновения неустойчивости на границе встречных потоков расстояние проветривания уменьшается с распадом единой циркуляции воздуха на несколько вихрей, затем при 60 м/с целостность циркуляции восстанавливается, при 70 м/с – опять распад, при 80 м/с расстояние проветривания достигает того же уровня, который наблюдается при 40 м/с. Подобные колебания зависимости дальности воздушной струи от её скорости свидетельствуют о том, что выше 40 м/с проветривание является ненадёжным ввиду возникновения неустойчивости единого циркуляционного вихря с образованием застойной зоны движения воздуха вблизи груди забоя [21]. Таким образом, максимальный положительный эффект достигается при оптимальном значении скорости струи, меньше которого дальность недостаточна, а при большем значении проветривание выработки оказывается неустойчивым.

### Заключение

По результатам анализа опытных данных и численного моделирования проветривания тупиковых выработок нагнетательным способом с отнесением

конца воздухопровода от груди забоя подтверждён сделанный ранее вывод о том, что дальность направлённой в тупик струи воздуха зависит не только от степени её стеснения, но и от начальной скорости. Установлено, что увеличение скорости струи за счёт уменьшения её сечения положительного эффекта не даёт, и глубина проветривания тупиковой выработки больше не становится. Численный анализ возможности использования камеры смешения для эжектирования возвратного потока воздуха показал, что, несмотря на незначительное увеличение расхода, менее чем в 2 раза, структура движения встречных потока воздуха на выходе из камеры смешения изменилась в лучшую сторону с образованием демптирующего вихря на границе раздела потоков. Необходимое значение дальности струи в 50 м из воздухопровода диаметром 0,5 м и камерой смешения диаметром 1,2 м достигается по результатам моделирования при дебите в 8 м<sup>3</sup>/с, что соответствует техническим характеристикам шахтных ВМП с учётом аэродинамического сопротивления воздухопровода. Увеличение расхода струи выше указанного значения имеет негативные последствия из-за неустойчивости циркуляционного вихря, распада его на два или более фрагментов и, как следствие, приводит к уменьшению расстояния проветривания.

Таким образом, по результатам проведённых исследований можно заключить, что использование эффекта эжектирования возвратного потока воздуха при проветривании тупиковых выработок решает проблему сохранности воздухопровода его отнесением от груди забоя на безопасное расстояние. Подбор оптимальных значений расхода воздуха, сечений струи и камеры смешения должен производиться численным моделированием для конкретных условий, т. к. проветривание может быть недостаточным и неустойчивым, и выяснить это аналитическим путём не представляется возможным.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596021 р\_НОЦ\_Пермский край.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes / A. Isaevich, M. Semin, L. Levin, A. Ivantsov, T. Lyubimova // Sustainability. – 2020. – V. 14. – № 5. – статья № 3030.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утв. приказом Ростехнадзора № 505 от 08.12.2020 г., рег. № 61651 Минюста от 21.12.2020 г., вступили в силу с 01.01.2021 г.
3. Технологический регламент по организации проветривания рудников ОАО «Уралкалий». – Пермь: Березники, 2005. – 136 с.
4. A discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels / M. García-Díaz, C. Sierra, C. Miguel-González, B. Pereiras // Energies. – 2019. – № 12. – P. 1–5.
5. Effect of heading face ventilation arrangement on regulation of dust distribution / Z. Zhou, P. Hu, Z. Han, J. Chen // Journal of Central South University. Science and Technology. – 2018. – V. 49. – № 9. – P. 2264–2271.
6. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S.M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 89. – P. 68–77.
7. Roghanch P., Kocsis K. C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study // International Journal of Mining and Mineral Engineering. – 2017. – V. 8. – № 4. – P. 280–293.
8. Nel A.J.H., Vosloo J.C., Mathews M.J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations // Journal of Energy in Southern Africa. – 2018. – № 29 (3). – P. 22–32.
9. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 15–23.
10. Мостепанов Ю.Б. Исследование дальности стесненной струи, действующей в забое тупиковой выработки // Известия Вузов/Горный журнал. – 1978. – № 11. – С. 47–50.

11. Козырев С.А., Амосов П.В. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 79–84.
12. Акт ОПИ по проветриванию тупиковых выработок после взрывных работ без использования сжатого воздуха (только вентиляторами местного проветривания) на руднике «Октябрьский» № 3Ф-95/29 – акт от 14.09.2009.
13. Experimental and numerical analysis of air flow in a dead-end channel / M. Branny, M. Jaszcuzur, W. Wodziak, J. Szmyd // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 745. – Iss. 3. – P. 1–8.
14. Обоснование безопасности опасного производственного объекта в части проветривания тупиковых горных выработок длиной более 10 метров на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель». – СПб: ООО «Институт Гипроникель», 2015. – 250 с.
15. Методика расчета количества воздуха и организации проветривания подземных рудников ОАО «Апатит». – Апатиты: Горный институт КНЦ РАН, 2008. – 42 с.
16. Улучшение проветривания тупиковой выработки путем увеличения начальной скорости воздуха в вентиляционной струе / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, О.С. Паршаков, А.В. Богомягков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 112–118.
17. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Анализ существующих методов расчёта эффективности работы эжекторных установок в рудниках // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2012. – № 1. – С. 40–46.
18. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения / С.В. Мальцев, Б.П. Казаков, А.Г. Исаевич, М.А. Семин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 46–57.
19. Павлов С.А. Проветривание призабойного пространства протяженной тупиковой выработки за счет эжекционного эффекта, возникающего при установке продольной перегородки // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 260–266.
20. Chanson H. Hydraulics of open channel flow: an introduction. 2<sup>nd</sup> ed. – London: Butterworth-Heinemann, 2004. – 650 p.
21. Zhang X., Zhang Y., Tien J.C. The efficiency study of the push-pull ventilation system in underground mine // Proceedings of the 2011 Coal Operators' Conference. Mining Engineering. – Wollongong: University of Wollongong, 18–20 February 2019. – P. 224–230.

Поступила 05.08.2022 г.

#### Информация об авторах

**Казаков Б.П.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Горный институт УрО РАН.

**Шалимов А.В.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт УрО РАН.

**Гришин Е.Л.**, кандидат технических наук, зав. сектором, Горный институт УрО РАН.

UDC 622.457.2

## EJECTING THE RETURN AIR FLOW ON INCREASING THE RANGE OF THE AIR JET DIRECTED INTO THE FACE OF THE DEAD-END DRIFT

Boris P. Kazakov<sup>1</sup>,  
aero\_kaz@mail.ru

Andrey V. Shalimov<sup>1</sup>,  
shalimovav@mail.ru

Evgeny L. Grishin<sup>1</sup>,  
aeroevg@mail.ru

<sup>1</sup> Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to develop resource-saving technologies for forced ventilation of dead-end drifts related to ensuring the safety of air ducts during blasting. The solution to the problem lies in the development of technical solutions that make it possible to remove the end of the air duct from the zone of damaging effects of flying fragments of rock, moving it away from the dead-end face to a safe distance without violating the safety rules.

**Purpose:** to develop a resource-saving method of dead-end drift ventilation, which provides the increase of the ventilation range by means of the kinetic energy of the air jet flowing from the booster fan with a mixing chamber.

**Objects:** dead-end drifts.

**Methods:** analytical and numerical modeling of the processes of air ejection and propagation of a constrained overlying air jet directed to a dead end; comparative analysis of experimental data and simulation results.

**Results.** The analysis of experimental data on the ventilation of dead-end drift by the ejection method with the lag of the end of the pipeline from the dead-end face was carried out. It is noted that the experimental dependencies obtained by various researchers for determining the range of the ventilation jet do not allow us to make an unambiguous conclusion about the permissible lagging distance due to too large spread in the values of the proportionality coefficient between it and the transverse dimension of the drifts. It was established that the reason for the scatter is the neglect of the dependence of the jet range on its initial velocity and flow rate, which is the less pronounced, the less constrained the jet is. The possibility of increasing the constraint and flow rate of the jet by ejection suction of the return air flow into the mixing chamber installed before the end of the pipeline is considered. The paper introduces the analytical model of the operation of an ejector installation with a permeable bulkhead, based on the results of which an increase in the jet flow rate due to recirculation was estimated. Despite the small value of the ejection coefficient, the numerical simulation of the process showed an unexpectedly strong increase in the ventilation range with an increase in the initial jet velocity in the real range, and the required pipeline lag result of 50 meters was achieved. It is shown that the proposed resource-saving method of forced ventilation of dead-end drifts requires a preliminary procedure for selecting and optimizing the geometric dimensions of the pipeline, mixing chamber and air flow, because in numerical simulation, both insufficient ventilation depth and loss of stability with the collapse of a single circulation vortex were observed during excessively intense air movement.

### Key words:

Pipeline, shock wave, mixing chamber, auxiliary fan, ejection effect, aerodynamic drag, instability, constrained spreading jet.

The research was financially supported by the RFBR and Perm region within the scientific project no. 20-45-596021 p\_НОЦ\_Пермский край.

### REFERENCES

1. Isaevich A., Semin M., Levin L., Ivantsov A., Lyubimova T. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes. *Sustainability*, 2020, vol. 14, no. 5, article no. 3030.
2. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh», utverzhden prikazom Rostekhnadzora № 505 ot 08.12.2020 g., reg. № 61651 Minjusta ot 21.12.2020 g., vstupili v silu s 01.01.2021 g.* [Federal norms and rules in the field of industrial safety «Safety Rules for mining and processing of solid minerals», approved by Rostekhnadzor Order No. 505 dated 08.12.2020, reg. No. 61651 of the Ministry of Justice dated 21.12.2020, entered into force on 01.01.2021].
3. *Tekhnologicheskiy reglament po organizatsii provetritvaniya rudnikov OAO «Uralkaliy»* [Technological regulations on the organization of ventilation of mines of JSC Uralkali]. Perm, Berezniki, 2005. 136 p.
4. García-Díaz M., Sierra C., Miguel-González C., Pereiras B. A discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels. *Energies*, 2019, no. 12, pp. 1–5.
5. Zhou Z., Hu P., Han Z., Chen J. Effect of heading face ventilation arrangement on regulation of dust distribution. *Journal of Central South University. Science and Technology*, 2018, vol. 49, no. 9, pp. 2264–2271.
6. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S.M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 89, pp. 68–77.
7. Roghanch P., Kocsis K. C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 280–293.
8. Nel A.J.H., Vosloo J.C., Mathews M.J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations. *Journal of Energy in Southern Africa*, 2018, no. 29 (3), pp. 22–32.
9. Kolesov E.V., Kazakov B.P. Efficiency of ventilation of dead-end development headings after blasting operations. *Bulletin of the*

- Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 15–23. In Rus.
10. Mostepanov Yu.B. Issledovanie dalnoboynosti stesennoy strui, deystvuyushchey v zabeo tupikovoy vyrabotki [Investigation of the range of a constrained jet acting in the face of a dead-end mine]. *Izvestia Vuzov. Mining Journal*, 1978, no. 11, pp. 47–50.
  11. Kozyrev S.A., Amosov P.V. Obosnovanie minimalnogo rasstoyaniya ot zaboya provodimoy vyrabotki do kontsa ventilyatsionnykh trub [Justification of the minimum distance from the bottom of the excavation to the end of the ventilation pipes]. *Labor safety in industry*, 2012, no. 10, pp. 79–84.
  12. *Akt OPI po provetrvaniyu tupikovykh vyrabotok posle vzryvnykh rabot bez ispolzovaniya shatogo vozdukh (tolko ventilyatorami mestnogo provetrvaniya) na rudnike «Oktyabrskiy» № ZF-95/29 - akt ot 14.09.2009* [The act of the OPI on the ventilation of dead-end workings after blasting without the use of compressed air (only with local ventilation fans) at the Oktyabrsky mine no. 3Φ-95/29 – act dated 14.09.2009].
  13. Branny M., Jaszcuzur M., Wodziak W., Szmyd J. Experimental and numerical analysis of air flow in a dead-end channel. *Journal of Physics: Conference Series* 745, 2016, vol. 745, Iss. 3, pp. 1–8.
  14. *Obosnovanie bezopasnosti opasnogo proizvodstvennogo obyekta v chasti provetrvaniya tupikovykh gornykh vyrabotok dlinoy bolee 10 metrov na rudnikakh ZF OAO «GMK «Norilskiy nikel»* [Justification of the safety of a hazardous production facility in terms of ventilation of dead-end mine workings with a length of more than 10 meters at the mines of the Polar Branch of OJSC MMC Norilsk Nickel]. St. Petersburg, Gipronickel Institute LLC Publ., 2015. 250 p.
  15. *Metodika rascheta kolichestva vozdukh i organizatsii provetrvaniya podzemnykh rudnikov OAO «Apatit»* [Methodology for calculating the amount of air and organizing ventilation of underground mines of JSC Apatit]. Apatity, Mining Institute KSC RAS Publ., 2008. 42 p.
  16. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Parshakov O.S., Bogomyagkov A.V. Improving the ventilation of a dead end by increasing the initial air velocity in a ventilation jet. *Journal of Mining Science*, 2022, no. 1, pp. 112–118. In Rus.
  17. Kazakov B.P., Shalimov A.V. Analiz sushchestvuyushchikh metodov rascheta effektivnosti raboty ezhektornykh ustanovok v rudnikakh [Analysis of existing methods for calculating the efficiency of ejector installations in mines]. *News of the Tula State University. Earth Sciences*, 2012, no. 1, pp. 40–46.
  18. Maltsev S.V., Kazakov B.P., Isaevich A.G., Semin M.A. Air exchange dynamics in the system of large cross-section blind roadways. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 2, pp. 46–57. In Rus.
  19. Pavlov S.A. Provetrvanie prizaboynogo prostranstva protyazhennoy tupikovoy vyrabotki za scet ezheksionnogo effekta, vznikayushchego pri ustanovke prodolnoy peregorodki [Ventilation of the bottomhole space of an extended dead-end working due to the ejection effect that occurs during the installation of a longitudinal partition]. *Fundamental and applied issues of mining sciences*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 260–266.
  20. Chanson H. *Hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Butterworth-Heinemann, 2004. 650 p.
  21. Zhang X., Zhang Y., Tien J. C. The efficiency study of the push-pull ventilation system in underground mine. *Proceedings of the 2011 Coal Operators' Conference, Mining Engineering*. Wollongong, University of Wollongong, 18–20 February 2019. pp. 224–230.

Received: 5 August 2022.

#### Information about the authors

- Boris P. Kazakov**, Dr. Sc., chief researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.
- Andrey V. Shalimov**, Dr. Sc., leading researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.
- Evgeny L. Grishin**, Cand. Sc., head of the sector, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 553.411.071:553.048

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСЧЁТА ДОСТОВЕРНОГО ОБЪЕМА ШЛАМОВОЙ ПРОБЫ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ РОССЫПНОГО ЗОЛОТА РУЧЬЯ БАЛАГАННАХ (РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))

Собянин Иван Юрьевич<sup>1</sup>,  
iys9@tpu.ru

Гаврилов Роман Юрьевич<sup>1</sup>,  
GavrilovRY@tpu.ru

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 «БАЛАГАННАХ ГОЛД»,  
Россия, 678730, Республика Саха (Якутия), пгт Усть-Нера, ул. Ленина, 27-41.

**Актуальность** исследования заключается в необходимости достоверного подсчета запасов россыпных месторождений золота с использованием всей полноты геологической, минералогической и статистической информации, что в дальнейшем позволит применять данный расчёт как основу при проектировании разведочных работ на россыпных месторождениях данного района.

**Цель:** расчёт необходимого объема шламовой пробы для достижения достаточной достоверности результатов опробования для корректного подсчета запасов. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: выбор и обоснование расчётной формулы объема шламовой пробы; учет характера распределения золота в россыпи, влияющего на объем опробования; расчёт необходимого объема шламовой пробы на примере месторождения россыпного золота.

**Методы:** минералогические исследования, статистическая обработка данных.

**Объект:** результаты опробования разведочных скважин и данные, полученные при эксплуатации месторождения.

**Результаты.** Установлено, что для россыпного месторождения золота Балаганнах объем пробы по одному сечению, необходимый для корректного подсчета запасов, составляет 157 литров. При разведке узких контуров необходимо использовать кустовое бурение скважинами с диаметром долота не менее 191 мм или бурение большим диаметром. Также для получения достоверных данных возможно использование методики размытия горных пород на продуктивном интервале. Для увеличения достоверности подсчета запасов возможно использование поправочных коэффициентов. Применение специализированных программ для подсчета запасов с использованием методов математической статистики позволяет проводить подсчет запасов, близкий к фактическим значениям. Там, где это позволяет мощность рыхлых отложений, рекомендуется использовать проходку канав, что позволяет существенно улучшить качество опробования и получить достоверные результаты.

### Ключевые слова:

Месторождение ручья Балаганнах, россыпное золото, шламовое опробование, достоверность результатов опробования, подсчет запасов.

### Постановка задачи

В современных экономико-политических условиях вопрос увеличения добычи золота как источника экспорта и пополнения бюджета Российской Федерации является одним из важнейших. Его решение напрямую связано с темпами роста добычи благородного металла [1–6]. Одним из значительных источников добычи золота являются россыпные месторождения [7–14]. Добыча благородного металла из россыпных месторождений, по сравнению с коренными [15–20], за последние десятилетия значительно снизилась, в связи с чем ведутся поиски новых россыпных объектов и вовлечение в эксплуатацию уже известных месторождений [21–22]. Таким образом, не теряет актуальность изучение строения россыпных месторождений золота, а также методических аспектов их разведки и отработки.

На россыпных месторождениях золота опробование, прежде всего, направлено на получение информации о количестве и качестве полезного компонента. Одним из важных параметров при опробовании является

установление минимального объема отбираемой пробы, необходимого для получения достоверного результата. В случае некорректного расчета данного показателя подсчитанные запасы на месторождении будут существенно отличаться от их истинного значения.

Целью настоящей работы является определение необходимого объема шламовой пробы и получение достоверных результатов опробования для последующего корректного подсчета запасов благородного металла. Для достижения поставленной цели на примере месторождения россыпного золота Балаганнах были решены следующие задачи: выбор и обоснование расчётной формулы объема шламовой пробы; учет характера распределения золота в россыпи, влияющего на объем опробования; расчет необходимого объема шламовой пробы.

### Геологическая характеристика месторождения

В административном отношении месторождение россыпного золота ручья Балаганнах расположено на

территории Оймяконского района Республики Саха (Якутия) (рис. 1).

В структурно-тектоническом отношении объект расположен в пределах Яно-Колымской складчатой зоны, входящей в состав Верхояно-Чукотской мезозойской складчатой области. Основные черты тектоники района определяются его положением в пределах Аян-Уряхского мегантиклиниория.

Район месторождения расположен в пределах Нерской золотоносной зоны. Основным полезным ископаемым является золото. Коренные рудопроявления золота, принадлежащие к малосульфидной золото-кварцевой формации, представляют собой жилы или зоны дробления и окварцевания пород. Протяженность жил колеблется в пределах 100...250 м при мощности 0,2...0,8 м.

В геологическом строении района принимают участие отложения верхоянского терригенного комплекса, смятые в складки и прорванные дайками позднемелового возраста, а также рыхлые континентальные четвертичные отложения. Широко распространены гидротермальные образования, несущие золото и золото-сурьмянное оруденение.

Металлогеническая специализация Нерской зоны определяется наличием многочисленных месторождений золота с доминирующей ролью малосульфидной золото-кварцевой формации.

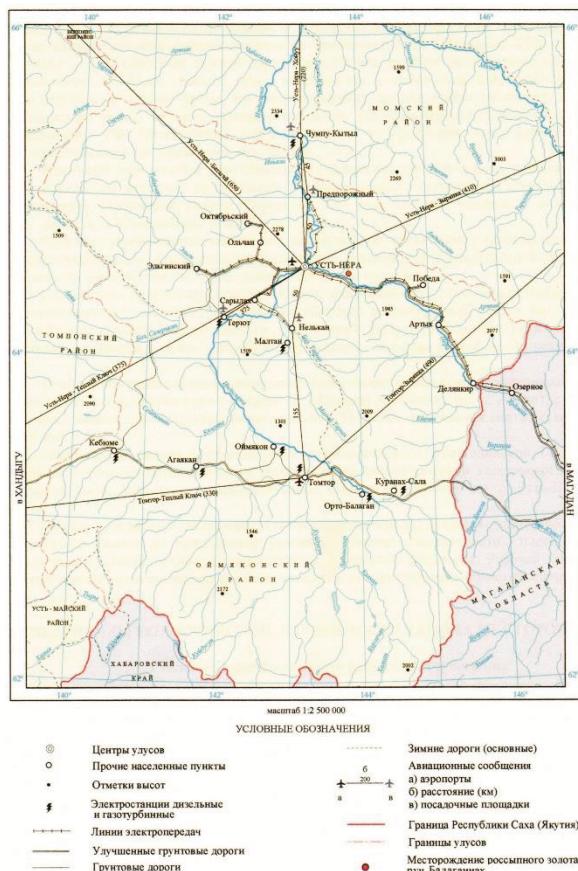


Рис. 1. Обзорная географо-экономическая схема Верхне-Индибирского района

Fig. 1. Overview geographic and economic scheme of the Verkhne-Indigirsky district

Ручей Балаганах является правым притоком р. Нера. Протяженность ручья около 22 км. Долина ручья имеет северо-восточное простирание, ее ширина, достигающая в створе 500 м, к верховью постепенно сужается до 50 м. Сечение долины асимметричное трапециевидное с крутым левым и более пологим правым склоном. По правому борту долины развиты террасы нескольких уровней, ширина которых от 100 до 900 м соответственно. По левому борту террасы с относительными отметками 15...60 м в значительной степени размыты и сохранились в виде фрагментов.

Террасы первого уровня (высотой 1...3 м) распространены по долине ручья Балаганах и его притокам (ручьи Арга-Сала, Кызыс, Дорожной). Террасы аккумулятивные. Мощность аллювия до 5 м, ширина до 100 м. Возраст отложений современный.

Террасы второго уровня (высотой 5...7 м) развиты преимущественно в нижнем, меньше в среднем течении ручья. Террасы аккумулятивные. Мощность аллювия до 10 м, ширина до 160 м. Возраст отложений современный.

Террасы третьего уровня (высотой 8...10 м) развиты в приустьевой части долины. Террасы цокольные. Мощность рыхлых отложений 3...10 м, ширина около 200 м. Возраст отложений – поздний плейстоцен.

Террасы четвертого уровня (высотой 15...20 м) сохранились по притокам ручья Балаганах (ручьи Арга-Сала, Дорожный). Террасы цокольные, мощность аллювия 5...10 м, ширина около 200 м. Возраст отложений – средний-поздний плейстоцен. Террасы пятого-шестого уровня (высотой 50...60 м) пользуются значительным распространением в долинах ручья и его притоков (ручьи Арга-Сала, Кызыс, Дорожный). Террасы цокольные. Мощность аллювия до 20 м. Ширина их до 900 м. Возраст отложений – средний-поздний плейстоцен.

Современная пойма имеет ширину до 300 м, постепенно сужаясь к истоку. Общая мощность рыхлых отложений 2...7 м.

Россыпное месторождение расположено в нижнем и среднем течении ручья Балаганах. Россыпь приурочена к пойменной части долины. На сегодняшний день россыпь разведана от устья ручья Балаганах до устья ручья Юморист – правого притока ручья Балаганах. Один из представительных разрезов приведен на рис. 2.

Сводный разрез отложений, вскрытых горными выработками в пределах разведанного участка россыпи между разведочными линиями №№ 90–102, приведен ниже.

Мощность рыхлых отложений составляет в среднем 4,4 м.

1. Растворительный слой. Мощность – 0,2...0,4 м;
2. Илисто-глинистые отложения с примесью песка и остатками древесной растительности. Мощность – 1,0 м.
3. Галечно-гравийные отложения с валунами, песком и глиной, сцементированные льдом. Обломочный материал представлен зернами кварца и обломками терригенных пород (песчаники, алев-

- ролиты, рассланцованные песчано-глинистые породы). Валуны до 0,5 м в диаметре, количество валунов 3...5 % в верхней части разреза, до 10 % в нижней части разреза. Глина серая, желтая, содержание ее увеличивается сверху вниз от 3...5 до 20...30 %. Галька и гравий различных форм и размеров хорошо окатаны. Льдистость отложений 5...10 %. Мощность слоя – 2,0 м.
4. Элювиальные отложения, мощностью, не превышающей 0,2 м, представленные щебнем, дресвой песчаников с глиной, песком и редкой галькой, развиты весьма незначительно.
  5. Коренные породы плотика представлены песчано-глинистыми сланцами, реже песчаниками, алевро-

литами. Песчаники среднезернистые, серого цвета с зеленоватым оттенком. Коренные породы часто пиритизированы и окваркованы. Для них характерна значительная трещиноватость. Трещины заполнены глинистой примазкой темно-серого цвета, часто с золотом. Мощность трещиноватых коренных пород в среднем составляет 1,0 м, хотя нередко доходит до 1,5...2 м.

Пласт песков месторождения ручья Балаганах перекрыт торфами небольшой мощности и представляет собой аллювиальную россыпь долинного типа. Происхождение россыпи связано с разрушением коренных золото-кварцевых малосульфидных жил, расположенных в верховьях ручья и в бортах долины.

### Условные обозначения Legend

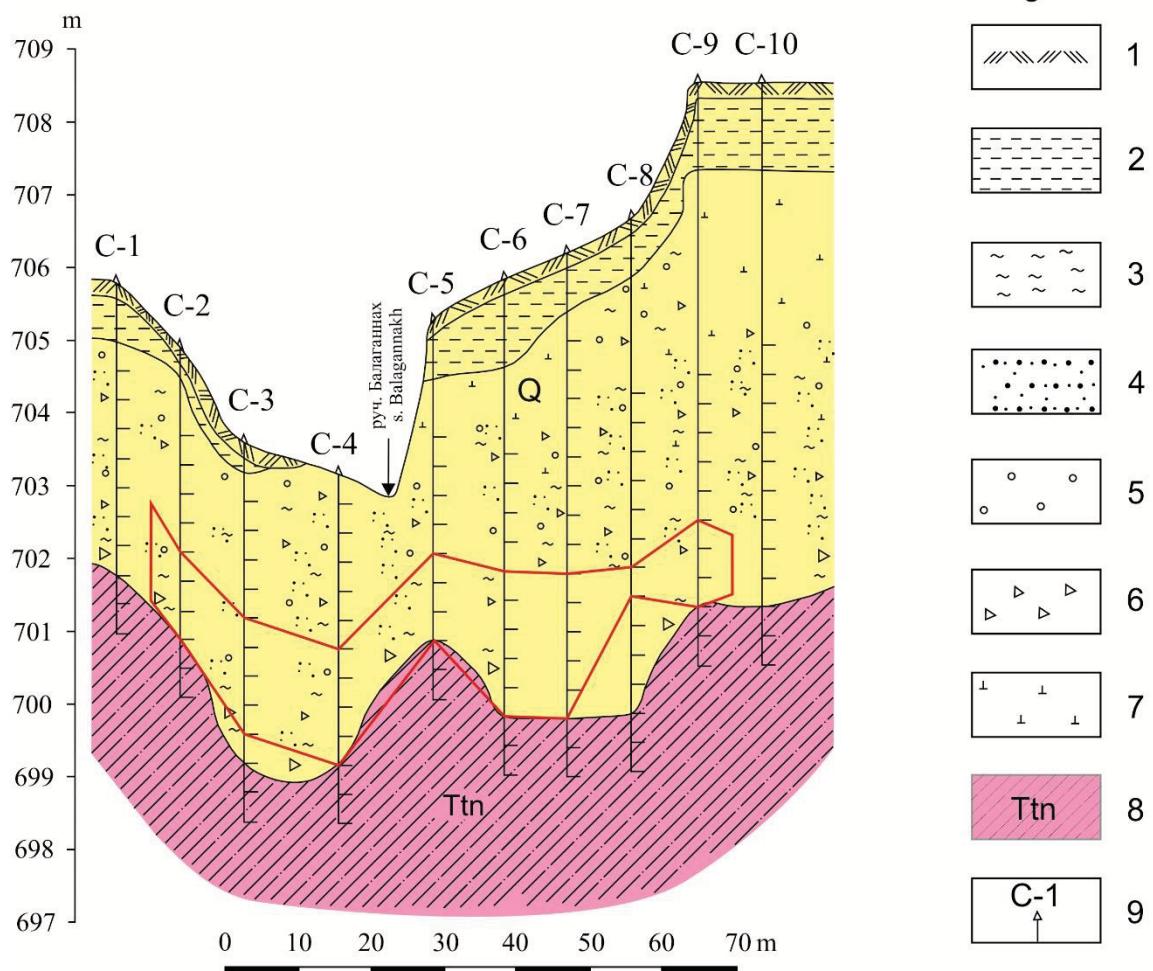


Рис. 2. Разрез по разведочной линии № 126. Четвертичные отложения (Q) 1–6: 1 – почвенно-растительный слой, 2 – ил, 3 – глина, 4 – песок, гравий, 5 – галька, валуны, 6 – щебень, дресва; 7 – лед; 8 – Тонорская свита (Ttn) – алевропесчаники; 9 – скважина и ее наименование; красная линия – контур рудного тела. Вертикальный масштаб 1:100, горизонтальный – 1:1000

Fig. 2. Section along exploration line no. 126. Quaternary deposits (Q) 1–6: 1 – soil-vegetative layer, 2 – silt, 3 – clay, 4 – sand, gravel, 5 – pebbles, boulders, 6 – crushed stone, gruss; 7 – ice, 8 – Tonorskaya suite – silty sandstone, 9 – drillhole and its name; red line – contour of the ore body. Vertical scale 1:100, horizontal – 1:1000

#### Характеристика россыпного металла

Россыпь месторождения ручья Балаганах характеризуется неравномерным распределением содержания золота в плане и в разрезе и значительными коле-

баниями мощности пласта. Золото является единственным ценным компонентом россыпи.

В россыпи преобладает среднее и хорошо окатанное пластинчатое золото с плавными очертаниями

краев сторон (рис. 3). Пластины тонкие, округлые и овальные, изредка треугольные. Поверхность золотин шероховатая до гладкой, значительно реже «дымячая», ямчатая. Имеются отдельные пластинки золотин, поверхность которых покрыта налетом типа «рубашки». Редко наблюдаются комковидные полуок-

танные зерна с бугорчато-ямчатым рельефом. Значительно реже наблюдаются дендриты «двухмерные», плоские, веточковидной формы с хорошо выраженным изогнутым центральным стволом и боковыми веточками. Цвет золота темно-желтый. Размер золотин достигает 10 мм и более.

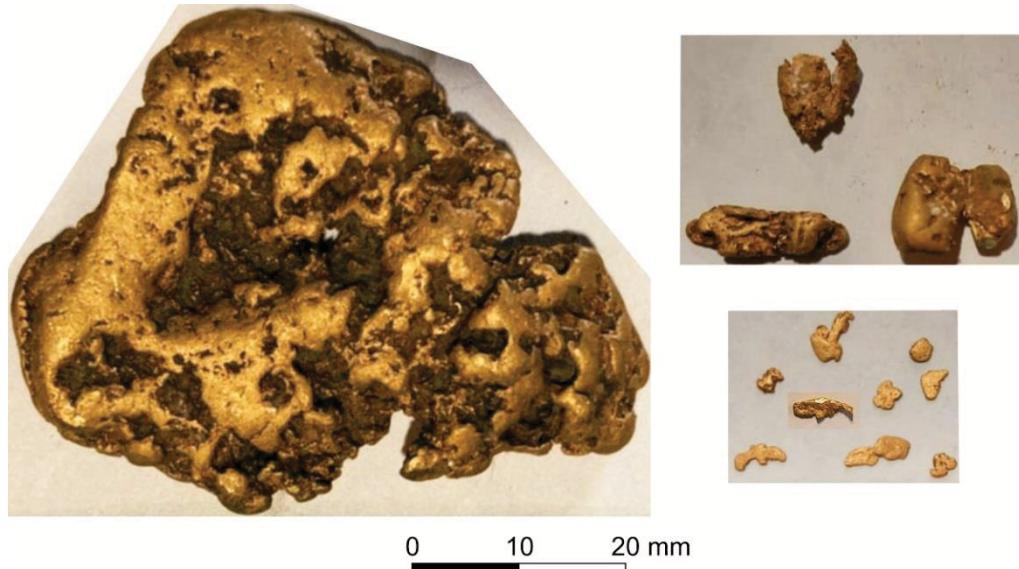


Рис. 3. Морфология золотин различных фракций. Слева – самородок массой 98 граммов

Fig. 3. Morphology of gold particles of various fractions. On the left – a nugget weighing 98 grams

Данные ситового анализа приведены в табл. 2. Средняя медианная крупность золота определена методом линейной интерполяции по формуле, описанной в [23], и составляет 1,71 мм. Фракция размерностью 0,2...2,0 мм является преобладающей и составляет 61,9 %. Средняя проба золота по россыпи – 900.

Согласно методическим рекомендациям ОАО «Иртигредмет», золото относится к средней крупности [24].

На основании минералогического изучения во всех шлиховых пробах в разных количествах обнаружены: кварц, полевой шпат, глинистые минералы, гранат, циркон, эпидот, кассiterит, пирит, халькопирит, арсенопирит и самородное золото. Помимо ранее перечисленных, в некоторых пробах отмечается присутствие: пирротина, борнита и гидролимонита.

Процент магнитной фракции от общего веса шлиховой пробы 7,36 % (ручей Балаганах) и 5,75 % (ручей Кызыс). Основная масса магнитной фракции представлена механической примесью (металлическая стружка и металлические шарики).

В результате разделения в электромагнитную фракцию попали: кварц, полевой шпат, слюда, глинистые минералы, кассiterит, циркон, эпидот. Процент электромагнитной фракции от общей массы шлихов 14,66 % (ручей Балаганах) и 22,83 % (ручей Кызыс). Наибольшим распространением пользуются глинистые минералы, кварц и полевые шпаты. Количество остальных минералов не более 0,15 %.

В неэлектромагнитной фракции встречаются зерна электромагнитной и магнитной фракции, а также гранат, пирит, халькопирит, арсенопирит, борнит, гидролимонит и самородное золото.

#### Методика исследования

В основу исследования положены результаты опробования шлама 15 разведочных скважин, расположенных на двух линиях 92-го полигона, пробуренных по сети 200×10 м, а также результаты эксплуатационных работ на месторождении россыпного золота ручья Балаганах (рис. 4).

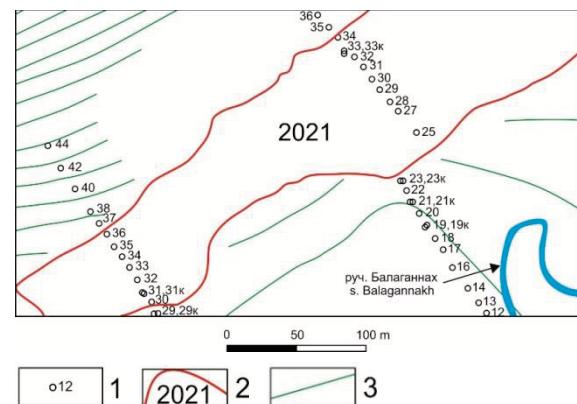


Рис. 4. Разведочный план полигона 92: 1 – скважина и ее наименование, 2 – контур участка, отработанного в 2021 г., 3 – изолинии рельефа

Fig. 4. Exploration plan for landfill 92: 1 – hole and its name, 2 – contour of the area worked out in 2021, 3 – relief contours

По результатам опробования шлама разведочных скважин были определены параметры пласта, как в плане, так и по разрезу, содержания золота по выработкам и блоку. Длина секций шламового опробова-

ния составляла 0,4 м. Среднее содержание золота по месторождению составило 0,65 г/м<sup>3</sup>.

Пробы, промытые на лотке, при наличии в шлихе золота отдувались и взвешивались, после этого набиралась навеска из золота шлихов и отправлялась в независимую лабораторию на контрольное взвешивание, проведение ситового анализа и определение пробности.

Контрольное взвешивание золота производилось для определения точности взвешивания золота в полевых условиях. Для определения распределения золота по классам крупности на ситах 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 2,0, 5,0 мм проводился ситовой анализ золота. Содержание химически чистого золота в составе самородного (проба) определялось пробирным методом анализа.

Бурение производилось ударно-канатным способом по рыхлым отложениям с углубкой в коренные породы в среднем на 1,2 м. Диаметр скважины по многолетнемерзлым породам – 195 мм. Для придания вертикального направления скважине, а также для перекрытия таликовых и сушенцовых зон производилось обсаживание скважины колонной труб с наружным диаметром 219 мм и диаметром стандартного башмака 225 мм и усиленного башмака 235 или 245 мм. Шлам из скважины поднимался посредством желонения. Полученный шлам выливался в мерный ящик, после чего пробуторивался для удаления глинистых частиц и сокращался. Работа желонки проверялась раз в неделю посредством подплющенной дроби. Допустимыми потерями было принято не более 1 дробинки из 10, а также проверялась работа промывальщика путем промывки по одной ендовой из промытых эфелей и гали со скважины; в случае обнаружения в них золота перемывался весь шлам. Так как объём пробы по замеру отличался не более чем на 10 % от теоретически расчётного, в подсчёт брался объём расчётный для обсаженного интервала на наружный диаметр башмака (225 мм), а для интервала, пробуренного без обсаживания, – на диаметр 195 мм.

Заверка качества буровых работ проводилась методом кустового бурения. Объём заверяемых скважин по каждому из классов вертикальных запасов составлял не менее 5 % от количества скважин в данном классе, участвующих в подсчете.

Подсчёт запасов производился методом геологических блоков с использованием программ AutoCAD и Excel.

### Результаты исследования и их обсуждение

В XX в. советскими, а затем и российскими исследователями были предложены многочисленные способы расчета достоверного объема шламовой пробы при опробовании россыпных месторождений золота. Рассмотрим наиболее часто используемые на практике.

В 1948 г. Л.И. Шаманским [25] была предложена формула, которая представляет собой расчёт шламовой пробы в общем виде:

Объем пробы (V) рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{P}{C},$$

где Р – масса металла по выработке, мг; С – среднее содержание металла, мг/м<sup>3</sup>.

Возможность ее применения ограничена нормальным распределением полезного компонента. Из формулы следует, что снижение среднего содержания металла ведет к необходимости увеличения объема отбираемого материала для достижения достоверного результата опробования.

Позднее А.П. Божинский [26] предложил рассчитывать объем пробы с использованием средней массы золотины характерных фракций:

$$V = \frac{d_{cp} \times K}{C},$$

где d<sub>cp</sub> – средняя масса золотин; К – число условных золотин средней массы в пробе (коэффициент надежности); С – бортовое содержание.

Поскольку средний размер золотины и число условных золотин средней массы имеют значительную долю неопределенности, то и вычисленный объем пробы также становится грубо приближенным, малодостоверным и во многом субъективным.

Наиболее обоснованной является формула, предложенная Буровым-Воладоровичем [26], которая единственная из представленных позволяет корректно рассчитать необходимый объем пробы на стадии проектирования разведочных работ:

$$V = \frac{K \times q}{C},$$

где К – коэффициент, выбираемый в зависимости от надежности обнаружения полезного компонента; q – средняя масса золотины медианного класса, мг; С – среднее содержание, мг/м<sup>3</sup>.

В 1948 г. Л.И. Шаманский для россыпей золота предложил использовать коэффициент надежности обнаружения полезного компонента равный шести [25].

Подсчёт запасов на месторождении производился традиционным способом с использованием программ AutoCAD и Excel. Коэффициент намыва, с учетом данных табл. 1, составил 63/52=1,21. Сравнивая разведочные и эксплуатационные данные по месторождению, мы наблюдаем фактическую достоверность результатов равную 52/63×100=82,5 %. Большего значения показателя достоверности можно добиться при использовании специализированных программ для подсчёта запасов, таких как Micromine, Datamine и др.

**Таблица 1. Сопоставление расчетного и фактически добывого золота**

**Table 1. Comparison of calculated and actually mined gold**

Объем недр Subsoil volume	Расчетное количество, кг (разведка) Estimated quantity, kg (exploration)	Фактически добыто, кг (эксплуатация) Actually mined, kg (exploitation)
Полигон 92 Polygon 92	25	33
Полигон 22 Polygon 22	27	30
Σ	52	63

Суммарный объём промытой пробы по двум линиям 92 полигона составил 287 литров. Среднее содержание по месторождению составляет 650 мг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, руководствуясь формулой Бурова-Воладоровича, необходимо произвести расчет минимального объема пробы, основываясь на гранулометрических характеристиках золота в россыпи (табл. 2).

**Таблица 2.** Показатели по классам крупности золота, используемые при расчете минимального объема пробы

**Table 2.** Indicators by gold size classes used in calculating the minimum sample volume

Показатели Indicators	Размер фракций, мм Fraction size, mm						
	0,1 <sup>2</sup>	0,2 <sup>0,5</sup> + <sup>+</sup>	0,5 <sup>1,0</sup> + <sup>+</sup>	1,0 <sup>2,0</sup> + <sup>+</sup>	2,0 <sup>5,0</sup> + <sup>+</sup>	5,0 <sup>+</sup>	
Количество золота во фракции, г Gold amount in the fraction, g	11	191	1412	3417	2918	155	
%	0,1	2,4	17,4	42,2	36,0	1,9	
Масса медианной золотины, мг Median gold weight, mg	0,04	0,4	1,2	8,8	155	1740	
Необходимый объем, л Required volume, l	0,3	3,6	11,3	82	1435	16061	
Достоверность при объеме пробы 287 л Confidence at a sample volume of 287 l	1	1	1	1	0,2	0,018	
Процент достоверности Confidence percentage	0,13	2,35	17,42	42,16	7,20	0,03	

По мере увеличения класса крупности металла по экспоненциальному закону происходит увеличение массы медианной золотины и необходимого объема пробы. Из этого следует, что на месторождениях россыпного золота больший размер средней золотины требует увеличения объема отбираемой пробы для достаточной достоверности опробования. Можно также отметить, что масса медианной золотины в соседних классах крупности отличается на порядок. Таким образом, гранулометрическая характеристика россыпей существенно влияет на необходимый объем пробы и массу медианной золотины.

Суммарная достоверность по классам крупности золота составила 69,3 % (табл. 2). Достоверность установленных запасов для категории  $C_1$  должна составлять не менее 70 %, что достаточно близко к рассчитанному значению.

Таким образом, на основании имеющихся данных по формуле Бурова-Воладоровича можно рассчитать достоверный объем шламовой пробы для одного сечения (выработки). Средняя крупность золотины на месторождении составляет  $d=1,71$  мм; минимальное содержание золота в краевой выработке –  $C_0=129$  мг/м<sup>3</sup>; градиент вскрыши –  $K_{вскр}=20$  мг/м<sup>3</sup>; средняя мощность вскрыши –  $M_b=4,3$  м; мощность продуктивного пласта –  $M_{пп}=0,95$  м, удельный вес золота при 900 пробности –  $p=17,9$  мг/мм<sup>3</sup>. Золотина медианного класса условно принимается изометричной формы, коэффициент уплощения  $K_y=0,14$ ; коэффициент надежности –  $K=6$ .

Объем золотины рассчитывался по формуле:

$$V_3 = \pi \times (D/2)^2 \times K_y = 3,14(1,71/2)^2 \times 0,14 = 0,32 \text{ мм}^3.$$

Масса золотины рассчитывалась по формуле:

$$q = V_3 \times p = 0,32 \times 17,9 = 5,74 \text{ мг.}$$

Среднее содержание рассчитывалось по формуле:

$$C = \frac{M_b}{M_{пп}} \times K_{вскр} + C_0 = \frac{4,3}{0,95} \times 20 + 129 = 219,5 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}.$$

Объем пробы составил:

$$V = \frac{K \times q}{C} = \frac{6 \times 5,74}{219,5} \times 1000 = 157 \text{ л.}$$

В результате расчета минимальный объем пробы при таких параметрах должен составить не менее 157 литров.

В свою очередь, объем пробы единичной выработки (скважина) при разведке 191-м диаметром долота и мощности продуктивного пласта 0,95 м составил 28,4 литра – это меньше расчетных 157 литров. Достоверность результатов для оконтуривающей выработки при таких параметрах составляет  $(28,4/157) \times 100 = 18\%$ . Отсюда следует, что при разведке краевых выработок и узких контуров необходимо увеличивать объем отбираемого материала не менее чем в 5,5 раз (157/28,4=5,5). Таким образом, к запасам категории  $C_1$  можно относить блоки, в подсчете которых участвуют шесть и более скважин, из которых возможен отбор минимально необходимого материала в объеме не менее 157 литров.

### Заключение

Установлено, что для россыпного месторождения золота ручья Балаганах объем пробы по одному сечению, необходимый для корректного подсчета запасов, составляет 157 литров.

При разведке узких контуров массы отбираемой пробы недостаточно. В данном случае необходимо использовать кустовое бурение скважинами с диаметром долота не менее 191 мм или бурение большим диаметром. Также для получения достоверных данных возможно использование методики размыва горных пород на продуктивном интервале.

Для увеличения достоверности подсчета запасов возможно использование поправочного коэффициента. Такой вариант предусмотрен методическими рекомендациями при достаточно жестком обосновании коэффициента.

Применение специализированных программ для подсчета запасов, таких как Datamine, Micromine, Leapfrog, позволит, используя весь арсенал статистических методов обработки данных, проводить подсчет запасов, близкий к фактическим значениям.

Там, где это позволяет мощность рыхлых отложений, рекомендуется использовать проходку канав, что существенно улучшит качество опробования и достоверность результатов.

Перечисленные мероприятия наряду с приведенными расчётами позволят увеличить сходимость данных разведочных работ с фактическими показателями содержания золота по месторождению. Полученные результаты могут успешно применяться на россыпных месторождениях Нерской золотоносной зоны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Перспективы развития минерально-сырьевой базы алмазов и золота Российской Федерации / А.И. Иванов, С.С. Вартанян, А.И. Черных, А.Г. Волчков, Ю.К. Голубев, В.С. Звездов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2016. – № 3. – С. 15–23.
- Иванов А.И., Черных А.И., Вартанян С.С. Состояние, перспективы развития и освоения минерально-сырьевой базы золота в Российской Федерации // Отечественная геология. – 2018. – № 1. – С. 18–28.
- Иванов А.И., Черных А.И., Вартанян С.С. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы золота в Российской Федерации // Смирновский сборник. – 2018. – С. 10–29.
- Черных А.И., Иванов А.И., Алексеев Я.В. Развитие минерально-сырьевой базы золота субъектов Российской Федерации в 2005–2018 гг. // Отечественная геология. – 2020. – № 1. – С. 21–28.
- Алексеев Я.В., Попов И.В. «Заявительный принцип», основные результаты работ на алмазы, благородные и цветные металлы // Отечественная геология. – 2021. – № 4–5. – С. 3–10.
- Благородные металлы Российской Федерации – состояние минерально-сырьевой базы и перспективы её развития / А.И. Иванов, Я.В. Алексеев, А.И. Черных, Е.А. Наумов, Д.А. Куликов, А.С. Тарасов, О.М. Конкина, К.М. Минькин, И.В. Попов // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 3–25.
- Youngson J.H., Craw D. Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bed-load rivers: an example from the Shotover/Arrow-Kawarau-Clutha River system, Otago, New Zealand // Economic Geology. – 1999. – V. 94. – № 5. – P. 615–634.
- Morphology and chemistry of placer gold from Attappadi Valley, Southern India / M. Nakagawa, M. Santosh, C.G. Nambiar, C. Matsubara // Gondwana Research. – 2005. – V. 8. – № 2. – P. 213–222.
- Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of bolotisty deposit / I.Yu. Rasskazov, N.G. Shkabarnya, V.S. Litvintsev, G.N. Shkabarnya // Eurasian Mining. – 2017. – V. 2. – P. 3–7.
- Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: implications for the exploration of primary gold deposit / J.D. Takodjou Wambo, S. Ganno, Y.S. Djonthu Lahe, G.D. Kouankap Nono, D.H. Fossi, M.S. Tchouatcha, J.P. Nzenti // Journal of African Earth Sciences. – 2018. – V. 142. – P. 138–157.
- Small-scale surface mining of gold placers: detection, mapping, and temporal analysis through the use of free satellite imagery / E. Ibrahim, L. Lema, P. Barnabé, P. Lacroix, E. Pirard // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2020. – V. 93. – 102194.
- Characterisation of alluvial gold exploration data to improve gold recovery in Ghana / G. Foli, K. Agyemang, B.A. Brako, S.K.Y. Gawu, P.M. Nude // Arabian Journal of Geosciences. – 2020. – V. 13. – № 20. – 1105.
- Exploration methodology using morphology and alloy composition of alluvial gold: a case study from quaternary deposits of the Nowshera District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan / L. Ali, R. Chapman, M. Farhan, M.T. Shah, S.A. Khattak, A. Ali // Mining, Metallurgy and Exploration. – 2021. – V. 38. – № 1. – P. 367–377.
- Nikiforova Z. Criteria for determining the genesis of placers and their different sources based on the morphological features of placer gold // Minerals. – 2021. – V. 4. – P. 1–23.
- Оленченко В.В., Осипова П.С. Электротомография аллювиальных отложений при поисковых работах на россыпное золото // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 1. – С. 117–129.
- Semeian T., Bold U. Placer Gold Deposits // Modern Approaches in Solid Earth Sciences. – 2021. – V. 19. – P. 103–128.
- Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration / J.W. Hedenquist, E. Izawa, A. Arribas, N.C. White // Resource Geology. – 1996. – V. 1. – P. 1–15.
- Савчук Ю.С., Асадуллин Эн.Э., Волков А.В., Аристов В.В. Уникальное месторождение золота Мурунтау (Узбекистан): геодинамическая позиция и происхождение рудообразующей системы // Геология рудных месторождений. – 2018. – Т. 60. – № 5. – С. 413–447.
- Волков А.В., Сидоров А.А. Прогнозно-поисковая модель месторождений золота, связанных с интрузивами гранитоидов арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 3 (31). – Р. 84–99.
- Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration / T.Yu. Yakich, Y.S. Ananyev, A.S. Ruban, R.Y. Gavrilov, D.V. Lesnyak, D.V. Levochskaya, O.V. Savinova, M.A. Rudmin // Ore Geology Reviews. – 2021. – V. 136. – 104257.
- Malloch K., Kerr G., Craw D. Placer gold in the Cretaceous Blue Spur Conglomerate at Waitahuna, southern New Zealand // New Zealand Journal of Geology and Geophysics. – 2017. – V. 60. – № 3. – P. 239–254.
- Колпаков В.В., Нестеренко Г.В., Неволько П.А., Жмодик С.М. Минералого-geoхимическая характеристика и вероятные коренные источники самородного золота россыпей Кельбес-Золотокитатского района (северная часть Кузнецкого Алатау) // Геосферные исследования. – 2021. – № 3. – С. 42–55.
- Лавров Н.П., Милентьев В.В. Практическое пособие по эксплуатации промывочных установок и шлихообогатительных фабрик. – Магадан: Кордис, 2005. – 206 с.
- Кавчик Б.К. Ситовый анализ и определение гранулометрических характеристик россыпного золота. Методические рекомендации. – Иркутск: Иргиредмет, 2001. – 15 с.
- Шаманский Л.И. Способы определения содержания металла в россыпях по результатам бурения – Иркутск: тип. «Вост.-Сиб. правда», 1948. – 44 с.
- Учитель М.С. Разведка россыпей. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1987. – 246 с.

Поступила 10.07.2022 г.

## Информация об авторах

**Собянин И.Ю.**, студент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

**Собянин Ю.П.**, главный геолог ООО «БАЛАГАННАХ ГОЛД».

UDC 553.411.071:553.048

## METHODOLOGICAL ASPECTS OF CALCULATING THE RELIABLE VOLUME OF A SLUDGE SAMPLE ON THE EXAMPLE OF A PLACER GOLD DEPOSIT IN THE BALAGANNAKH STREAM (REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA))

Ivan Yu. Sobyanin<sup>1</sup>,

iys9@tpu.ru

Roman Yu. Gavrilov<sup>1</sup>,

Gavrilovry@tpu.ru

Yuri P. Sobyanin<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 Balagannakh gold,

27-41, Lenin street, Republic of Sakha (Yakutia), Ust-Nera, 678730, Russia.

**The relevance** of the study lies in the need for reliable calculation of the reserves of placer gold deposits using the entirety of geological, mineralogical and statistical information, which in the future will allow using this calculation as a basis for designing exploration work on placer deposits in this area.

**The purpose:** calculation of the required volume of a sludge sample to achieve sufficient reliability of the sampling results for a correct calculation of reserves. To achieve this goal, the following tasks were solved: the calculation formula for the volume of the sludge sample was selected and justified; the nature of gold distribution in the placer, which affects the volume of sampling, was taken into account; the required volume of a sludge sample was calculated using the example of a placer gold deposit.

**Methods:** mineralogical studies, statistical data processing.

**Object:** the results of testing exploration wells and data obtained during the operation of the field.

**Results.** It was established that for the Balagannakh placer gold deposit, the sample volume in one section, which is necessary for the correct calculation of reserves, is 157 liters. When exploring narrow contours, it is necessary to use cluster drilling with wells with a bit diameter of at least 191 mm or drilling with a large diameter up to 400 mm. Also, to obtain reliable data, it is possible to use the method of rock erosion in the productive interval. To increase the reliability of the calculation of reserves, it is possible to use correction factors. The use of specialized programs for calculating reserves using the methods of mathematical statistics will make it possible to calculate reserves that are close to actual values. Where the thickness of loose sediments allows, it is recommended to use ditching, which will significantly improve the quality of sampling and obtain reliable results.

### Key words:

Balagannakh stream deposit, placer gold, sludge sampling, reliability of sampling results, inventory count.

### REFERENCES

1. Ivanov A.I., Vartanyan S.S., Chernykh A.I., Volchkov A.G., Golubev Yu.K., Zvezdov V.S. Prospects for the development of the mineral resource base of diamonds and gold in the Russian Federation. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2016, no. 3, pp. 15–23. In Rus.
2. Ivanov A.I., Chernykh A.I., Vartanyan S.S. Status, prospects for the development and development of the mineral resource base of gold in the Russian Federation. *Otechestvennaya geologiya*, 2018, no 1, pp. 18–28. In Rus.
3. Ivanov A.I., Chernykh A.I., Vartanyan S.S. Sostoyanie i perspektiviya mineralno-syryevoy bazy zolota v Rossiyskoy Federatsii [Status and prospects for the development of the mineral resource base of gold in the Russian Federation]. *Smirnovsky collection*, 2018, pp. 10–29.
4. Chernykh A.I., Ivanov A.I., Alekseev Ya.V. Development of the mineral resource base of gold in the constituent entities of the Russian Federation in 2005–2018. *Otechestvennaya geologiya*, 2020, no. 1, pp. 21–28. In Rus.
5. Alekseev Ya.V., Popov I.V. «Declaration principle», the main results of work on diamonds, precious and non-ferrous metals. *Otechestvennaya geologiya*, 2021, no. 4–5, pp. 3–10. In Rus.
6. Ivanov A.I., Alekseev Ya.V., Chernykh A.I., Naumov E.A., Kulikov D.A., Tarasov A.S., Konkina O.M., Minkin K.M., Popov I.V. Precious metals of the Russian Federation – the state of the mineral resource base and the prospects for its development. *Otechestvennaya geologiya*, 2022, no. 1, pp. 3–25. In Rus.
7. Youngson J.H., Craw D. Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bed-load rivers: an example from the Shotover/Arrow-Kawarau-Clutha River system, Otago, New Zealand. *Economic Geology*, 1999, vol. 94, no. 5, pp. 615–634.
8. Nakagawa M., Santosh M., Nambiar C.G., Matsubara C. Morphology and chemistry of placer gold from Attappadi Valley, Southern India. *Gondwana Research*, 2005, vol. 8, no. 2, pp. 213–222.
9. Rasskazov I.Yu., Shkabarnya N.G., Litvinsev V.S., Shkabarnya G.N. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of bolotisty deposit. *Eurasian Mining*, 2017, vol. 2, pp. 3–7.
10. Takodjou Wambo J.D., Ganno S., Djonthu Lahe Y.S., Kouankap Nono G.D., Fossi D.H., Tchouatcha M.S., Nzenti J.P. Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: implications for the exploration of primary gold deposit. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, vol. 142, pp. 138–157.
11. Ibrahim E., Lema L., Barnabé P., Lacroix P., Pirard E. Small-scale surface mining of gold placers: Detection, mapping, and temporal analysis through the use of free satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, vol. 93, 102194.
12. Foli G., Agyemang K., Brako B.A., Gawu S.K.Y., Nude P.M. Characterisation of alluvial gold exploration data to improve gold recovery in Ghana. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, no. 20, 1105.
13. Ali L., Chapman R., Farhan M., Shah M.T., Khattak S.A., Ali A. Exploration Methodology Using Morphology and Alloy

- Composition of Alluvial Gold: A Case Study from Quaternary Deposits of the Nowshera District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. Mining, Metallurgy and Exploration, 2021, vol. 38, no. 1, pp. 367–377.
14. Nikiforova Z. Criteria for determining the genesis of placers and their different sources based on the morphological features of placer gold. *Minerals*, 2021, vol. 4, pp. 1–23.
15. Olenchenko V.V., Osipova P.S. Electrical Resistivity Tomography of Alluvial Deposits during Prospecting for Placer Gold. Russian Geology and Geophysics, 2022, vol. 63, no. 1, pp. 117–129. In Rus.
16. Semeihian T., Bold U. Placer Gold Deposits. *Modern Approaches in Solid Earth Sciences*, 2021, vol. 19, pp. 103–128.
17. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White N.C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Resource Geology*, 1996, vol. 1, pp. 1–15.
18. Savchuk Y.S., Asadulin E.E., Volkov A.V., Aristov V.V. Unique gold deposit Muruntau (Uzbekistan): geodynamic position and origin of the ore-forming system. *Geology of Ore Deposits*, 2018, vol. 60, no. 5, pp. 413–447.
19. Volkov A.V., Sidorov A.A. Predictive-search model of gold deposits associated with granitoid intrusions of the Arctic zone of Russia. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 3 (31), pp. 84–99. In Rus.
20. Yakich T.Y., Ananyev Y.S., Ruban A.S., Gavrilov R.Y., Lesnyak D.V., Levochskaia D.V., Savinova O.V., Rudmin M.A. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration. *Ore Geol. Rev.*, 2021, vol. 136, 104257.
21. Malloch K., Kerr G., Craw D. Placer gold in the Cretaceous Blue Spur Conglomerate at Waitahuna, southern New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 239–254.
22. Kolpakov V.V., Nesterenko G.V., Nevolko P.A., Zhmodik S.M. Mineralogical-geochemical characteristic and the potential ore sources of placer native gold in kelbes-zolotokitat region (North Kuznetsk Alatau). *Geosfernye Issledovaniya*, 2021, no. 3, pp. 42–55.
23. Lavrov N.P., Milentiev V.V. *Prakticheskoe posobie po ekspluatatsii promyshlennyykh ustyanovok i shlikhoobogatitelnykh fabrik* [A practical guide to the operation of washing plants and schlichko-concentrating factories]. Magadan, Kordis Publ., 2005. 206 p.
24. Kavchik B.K. *Sitovy analiz i opredelenie granulometricheskikh kharakteristik rossypnogo zolota. Metodicheskie rekomendatsii* [Sieve analysis and determination of the granulometric characteristics of alluvial gold. Guidelines]. Irkutsk, Irigiredmet Publ., 2001. 15 p.
25. Shamansky L.I. *Sposoby opredeleniya soderzhaniya metalla v rossyip po rezul'tatam bureniya* [Methods for determining the metal content in the placer based on the results of drilling]. Irkutsk, Pravda Publ., 1948. 44 p.
26. Uchitel M.S. *Razvedka rossyip* [Placer exploration]. Irkutsk, Irkutsk university Publ., 1987. 246 p.

Received: 10 July 2022.

#### Information about the authors

**Ivan Yu. Sobyanin**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Roman Yu. Gavrilov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Yuri P. Sobyanin**, chief geologist, LLC BALAGANNAKH GOLD.

УДК 550.47:550.424.6

## ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИЗОТОПОВ, МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ИЗ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ В ЛИШАЙНИКАХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Кропачева Марья Юрьевна<sup>1</sup>,  
marya@igm.nsc.ru

Восель Юлия Сергеевна<sup>1</sup>,  
vosel@igm.nsc.ru

Мезина Ксения Александровна<sup>1</sup>,  
mezinaka@igm.nsc.ru

Белянин Дмитрий Константинович<sup>1</sup>,  
bel@igm.nsc.ru

Мельгунов Михаил Сергеевич<sup>1</sup>,  
mike@igm.nsc.ru

Макарова Ирина Владимировна<sup>1</sup>,  
makarova@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 3.

**Актуальность** исследования обусловлена началом активного промышленного освоения арктических территорий России. Для корректной оценки техногенного воздействия необходимо знать региональные уровни геохимического фона, а также пути атмосферного переноса вещества. Лишайники широко используются в качестве биоиндикаторов не только антропогенного загрязнения, но и значимых природных процессов, к примеру, локального или глобального атмосферных переносов и биогеохимических процессов перераспределения элементов.

**Цель:** определить содержания микро- и макроэлементов ( $Mg$ ,  $Al$ ,  $Si$ ,  $P$ ,  $K$ ,  $Ca$ ,  $Ti$ ,  $V$ ,  $Cr$ ,  $Fe$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ,  $Cu$ ,  $Zn$ ,  $Sr$ ,  $Zr$ ,  $Cd$ ,  $Ba$ ,  $La$ ,  $Ce$ ,  $Eu$ ,  $Pb$ ,  $Nb$ ,  $Mo$ ,  $Nd$ ,  $Hf$ ,  $Ta$ ,  $W$ ,  $Th$ ,  $U$ ,  $Sn$ ,  $REE$ ), природных и искусственных изотопов ( $^{7}Be$ ,  $^{210}Pb$ ,  $^{137}Cs$ ) в лишайниках, а также их распределение между фракциями биомассы.

**Объекты:** лишайники из лесотундры арктической зоны Западной Сибири: Ямало-Ненецкий Автономный округ, район Нового Уренгоя.

**Методы:** фракционирование биомассы лишайника с выделением четырех фракций; определение стабильных элементов – ИСП-АЭС и ИСП-МС; определение природных и искусственных изотопов – гамма-спектрометрия с использованием колодезного детектора.

**Результаты.** Содержания микро- и макроэлементов в лишайниках не показывают наличие значительного антропогенного воздействия. Все изученные элементы распределяются на две большие группы по характерным признакам распределения по фракциям биомассы лишайника. В первой группе элементы прочно связываются с биомассой лишайника за счет механического захвата частиц пыли из атмосферных выпадений. Элементы из второй группы испытывают физико-химическое воздействие со стороны лишайника и в различной степени распределяются по всем фракциям биомассы лишайника.

### Ключевые слова:

$^{7}Be$ ,  $^{210}Pb$ ,  $^{137}Cs$ , микроэлементы, лишайники, SET, атмосферные выпадения, Арктика

### Введение

Использование лишайников в качестве индикаторов качества воздуха практикуется с середины XIX в. [1]. С тех пор исследования атмосферных выпадений с помощью лишайников широко распространены по всем климатическим зонам: Европа [2–7], Северная Америка [8, 9], Шри-Ланка [9], Западная и Восточная Сибирь [9, 10], Южная Африка [11], Антарктика [12]. Наиболее важны такие исследования в полярных областях. Полярные экосистемы сравнительно бедны компонентами, а лишайники являются важнейшей их составляющей, представленной повсеместно, что позволяет соотносить полученные данные из различных регионов. Помимо проблемы биоиндикации атмосферных выпадений различной локализации [7, 13–16], исследования охватывают широкий спектр вопросов:

использование изотопных соотношений для выяснения путей переноса атмосферных загрязнений [17, 18], геохимия лишайников [19, 20], аккумуляция лишайниками химических элементов и неорганических соединений – ртути [1, 21], тяжелых металлов [22, 23], REE и микроэлементов [24], органических веществ [25]; антропогенное воздействие от освоения недр [25–28]; переход тяжелых металлов, органических соединений и изотопов по пищевым цепочкам полярных экосистем [29–31]; содержания изотопов в полярных лишайниках и оценка их радиоактивного загрязнения [31–38].

Важным с геохимической и экологической точек зрения представляется прогнозирование дальнейших путей миграции поглощенных лишайниками элементов: накопление в процессе биоаккумуляции и даль-

нейший переход по трофическим путям или переход в связанное/легкоподвижное состояние при отмирании биомассы; осаждение на биомассе в неизменном виде за счет механической сорбции и освобождение в неизменном виде при отмирании биомассы или смыв с биомассы в результате осадков. Методика ступенчатого выщелачивания биомассы (sequential elution technique, SET) разработана как инструмент для исследований атмосферного загрязнения тяжелыми металлами. Она широко применяется на различных природных планшетах, в том числе и на лишайниках [39–41]. Применение этой методики позволяет разделять фракцию, сорбированную на поверхности, и фракцию, связанную с биологическим концентрированием [42].

Представленные результаты являются частью исследования атмосферного переноса вещества в Арктической части России [43–46].

### Объекты и методы

#### Пробоотбор

Экспедиционные работы проводились в сентябре–октябре 2019 г. в Ямало-Ненецком Автономном округе в районе Нового Уренгоя. Отбор двух большеобъемных проб лишайника вида кладония оленя (Cladonia rangiferina L.) производился в точке с координатами N 65°36'17.4" E 73°55'44.3". Мы отбирали лишайник целиком на всю толщину таллома, с площади 1 м<sup>2</sup>. Затем мы укладывали слои лишайника в чистые контейнеры таким образом, чтобы дерновые части соседних слоев лежали навстречу друг другу. Листы фильтровальной бумаги, смоченной дистиллированной водой, укладывались на дно контейнера, между дерновыми частями двух слоев и под крышку контейнера, после чего тот плотно закрывался. Подобная упаковка большеобъемной пробы позволяла сохранить пробу лишайника в живом и влажном состоянии, обеспечивая таким образом ненарушенность биомассы перед началом фракционирования, причем на протяжении достаточно длительного времени: от 1–2 недель (без заморозки) до нескольких месяцев (с заморозкой при –10–15 °C).

В лабораторных условиях отделялась верхняя половина таллома, не затронутая процессами разложения. Таллом очищался от крупного растительного мусора, измельчался на кусочки объемом 0,5 см<sup>3</sup>, из которых тщательно убиралась хвоя, оказавшаяся внутри таллома в процессе его роста. Из очищенной биомассы выделялись навески по 100 г сырого веса: поскольку нам необходимо было изучить распределение не только микро- и макроэлементов, но и естественных и искусственных изотопов в биомассе планшета, масса навески была значительно увеличена [47] по сравнению с обычными 5–10 г [48–51].

#### Фракционирование биомассы

В нашем эксперименте предполагалось выделение следующих фракций: фракция 0 (элементы, сорбированные на пылевых частицах, не успевшие связаться с биомассой); фракция 1 (элементы из межклеточного пространства и связанные с внешней стороной кле-

точных стенок); фракция 2 (элементы, связанные с внутренними поверхностями цитоплазматических мембран и/или растворенные внутри клетки); фракция 3 (элементы, прочно связанные в клеточной стенке и ассоциированных с ней структурах, и твердый остаток, в который входят нерастворимые элементы и кристаллические отложения внутри клетки). Фракция 0 рассматривалась как несвязанная с биомассой и называлась смывом, фракции 1 и 2 – как слабо связанные с биомассой, фракция 3 – как прочно связанные с биомассой.

Фракция 0 выделялась промыванием образцов биомассы бидистиллированной водой в соотношении 1:10 в течение 30–60 секунд. Фракция 1 выделялась добавлением 0,1 М Na<sub>2</sub>EDTA к образцам биомассы в соотношении 1:10, время экстракции составляло 24 часа при периодическом встряхивании. После отделения раствора биомассу сушили до воздушно сухого состояния. Фракция 2 выделялась промыванием 1 М HNO<sub>3</sub>, добавленной к образцам биомассы в соотношении 1:10, время экстракции 20 мин при перемешивании. После выделения фракций 1 и 2 образцы биомассы промывали бидистиллированной водой, которую затем объединяли с экстрагентами. Все растворы выпаривали до 25 мл и разлагали смесью HNO<sub>3</sub> и HClO<sub>4</sub>. Оставшаяся после экстракции биомасса представляла собой фракцию 3; она озолялась в муфельной печи при температуре 450 °C с постепенным повышением температуры с шагом 50 °C.

#### Аналитические методы

Определение содержаний <sup>7</sup>Be, <sup>210</sup>Pb и <sup>137</sup>Cs проводилось методом полупроводниковой гаммаспектрометрии с использованием HPGe колодезного детектора (GWL-220- 15). Для определения радионуклидов использовались следующие спектральные линии: для <sup>7</sup>Be – 477 кэВ, эффективность регистрации 5–4 %; <sup>210</sup>Pb – 46,5 кэВ, эффективность регистрации 60 %; <sup>137</sup>Cs – 662 кэВ, эффективность регистрации 5–4 %. Предел обнаружения составил 0,02 Бк. Время измерения составляло от 3 до 24 часов и выбиралось таким образом, чтобы статистическая ошибка при определении площадей аналитических фотопиков не превышала 5 %.

Макро- и микроэлементы определяли двумя методами: твердые образцы – ICP-MS на приборе Agilent QQQ 8800 с реакционно-коллизионной ячейкой, диапазон определяемых концентраций 0,05–5·10<sup>4</sup> ppm, относительная ошибка измерения 25 %; растворы – ICP-AES на приборе iCap 6500 Duo (Thermo Scientific, США), диапазон определяемых концентраций 0,05–5·10<sup>4</sup> ppm, относительная ошибка измерения 15 %.

Для всех твердых образцов концентрация на сухой вес вычислялась из концентрации в золе. Средняя зольность валовых проб равна 0,006, проб 3 фракции – 0,002.

#### Результаты и обсуждение

Содержания элементов в валовой пробе и во фракции 3 представлены в табл. 1. Содержания стабильных элементов во всех валовых пробах и пробах

фракции 3 ниже полученных в других подобных исследованиях, например, для эпигейных лишайников из фонового района водосборного бассейна Белого моря [19] или лишайников из полярных областей Канады [24], и в основном ниже уровней кларков элементов для наземной растительности [52]. В ряде исследований делается вывод о наличии захваченных частиц в слоеице лишайников на основании сход-

ства соотношений Fe/Ti в лишайниках и горном материале [6]. Соотношение Fe/Ti для среднего состава литосферы равно 6,5, а ожидаемое соотношение для лишайников из незагрязненных территорий варьируется от  $7,0 \pm 0,2$  до  $7,9 \pm 0,7$  [6, 20]. Полученное нами соотношение Fe/Ti, равное 8,4, указывает на то, что на изученном участке заметного антропогенного воздействия не наблюдается.

**Таблица 1. Концентрации элементов в лишайниках, ppm**  
**Table 1. Elements concentration in lichen, ppm**

	район Нового Уренгоя, ЯНАО Novy Urengoi area, YNAD	3 фракция $\pm$ общая ошибка метода (критерий $2\sigma$ ) 3 fraction $\pm$ method total error (2 $\sigma$ criterion) (n=4)	Водосборный бассейн Белого моря White Sea catchment area M $\pm$ SD, n=25 [19]	Нунавут, Канада Nunavut, Canada M $\pm$ SD, n=12 [24]	Кларк растительности суши Abundance of elements in terrestrial vegetation [52]
валовая проба $\pm$ общая ошибка метода (критерий $2\sigma$ ) bulk sample $\pm$ method total error (2 $\sigma$ criterion) (n=4)					
Mg	185 $\pm$ 28	16 $\pm$ 2	241 $\pm$ 84	—	700
Al	215 $\pm$ 32	46 $\pm$ 7	260 $\pm$ 147	—	200
Si	831 $\pm$ 125	163 $\pm$ 24	—	—	1500
P	306 $\pm$ 46	52 $\pm$ 8	—	—	700
K	792 $\pm$ 119	28 $\pm$ 4	1000 $\pm$ 248	3457 $\pm$ 2086	3000
Ca	347 $\pm$ 52	14 $\pm$ 2	432 $\pm$ 310	3865 $\pm$ 2710	5000
Sc	$3,8 \cdot 10^{-2} \pm 0,6 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2} \pm 0,2 \cdot 10^{-2}$	—	0,51 $\pm$ 0,64	—
Ti	16,7 $\pm$ 2,5	4,0 $\pm$ 0,6	13,5 $\pm$ 8,7	—	n
V	0,43 $\pm$ 0,07	0,08 $\pm$ 0,01	1,12 $\pm$ 1,09	5,51 $\pm$ 7,36	n
Cr	0,78 $\pm$ 0,12	0,19 $\pm$ 0,03	$35 \cdot 10^{-2} \pm 22 \cdot 10^{-2}$	3,8 $\pm$ 3,8	$n \cdot 10^{-1}$
Fe	140 $\pm$ 21	19 $\pm$ 3	167 $\pm$ 80	1522 $\pm$ 1764	200
Co	$7,0 \cdot 10^{-2} \pm 1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2} \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2} \pm 5,4 \cdot 10^{-2}$	0,90 $\pm$ 0,86	0,2
Ni	0,39 $\pm$ 0,06	0,1 $\pm$ 0,02	1,9 $\pm$ 2,1	3,25 $\pm$ 1,67	0,5
Cu	0,89 $\pm$ 0,013	0,18 $\pm$ 0,03	0,96 $\pm$ 0,26	3,61 $\pm$ 4,07	2
Zn	7,9 $\pm$ 1,2	0,33 $\pm$ 0,05	12,2 $\pm$ 3,3	22 $\pm$ 8	20
Sr	1,7 $\pm$ 0,3	0,27 $\pm$ 0,04	2,7 $\pm$ 1,3	22,77 $\pm$ 18,52	20
Y	0,11 $\pm$ 0,02	$3,7 \cdot 10^{-2} \pm 0,6 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2} \pm 3,9 \cdot 10^{-2}$	0,81 $\pm$ 0,73	0,3
Zr	0,93 $\pm$ 0,14	0,22 $\pm$ 0,03	0,45 $\pm$ 0,39	—	3
Nb	$4,8 \cdot 10^{-2} \pm 0,7 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2} \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2} \pm 2,6 \cdot 10^{-2}$	—	—
Mo	$2,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-3} \pm 0,9 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2} \pm 2,6 \cdot 10^{-2}$	0,19 $\pm$ 0,09	$n \cdot 10^{-1}$
Cd	$9,8 \cdot 10^{-2} \pm 1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3} \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-2} \pm 2,5 \cdot 10^{-2}$	0,15 $\pm$ 0,07	$n \cdot 10^{-3}$
Sn	$8,8 \cdot 10^{-2} \pm 1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2} \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$	—	—	$n \cdot 10^{-1}$
Ba	4,4 $\pm$ 0,7	0,61 $\pm$ 0,09	3,1 $\pm$ 1,9	82,28 $\pm$ 84,21	$n \cdot 10$
La	0,12 $\pm$ 0,02	$2,7 \cdot 10^{-2} \pm 0,4 \cdot 10^{-2}$	0,30 $\pm$ 0,25	1,90 $\pm$ 1,62	$n \cdot 10$
Ce	0,24 $\pm$ 0,04	$4,8 \cdot 10^{-2} \pm 0,7 \cdot 10^{-2}$	0,28 $\pm$ 0,27	5,32 $\pm$ 5,22	$n \cdot 10$
Nd	0,1 $\pm$ 0,02	$3,4 \cdot 10^{-2} \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$	0,13 $\pm$ 0,12	1,682 $\pm$ 1,401	$n \cdot 10$
Sm	$2,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-2} \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2} \pm 1,7 \cdot 10^{-2}$	0,312 $\pm$ 0,273	$n \cdot 10$
Eu	$4,9 \cdot 10^{-3} \pm 0,7 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3} \pm 0,1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-3}$	0,079 $\pm$ 0,070	$n \cdot 10$
Gd	$1,8 \cdot 10^{-2} \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2} \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2} \pm 1,0 \cdot 10^{-2}$	0,235 $\pm$ 0,198	$n \cdot 10$
Tb	$2,9 \cdot 10^{-3} \pm 0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3} \pm 0,1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3} \pm 1,4 \cdot 10^{-3}$	0,039 $\pm$ 0,035	$n \cdot 10$
Dy	$1,8 \cdot 10^{-2} \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-3} \pm 0,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,6 \cdot 10^{-2}$	0,185 $\pm$ 0,166	$n \cdot 10$
Ho	$3,7 \cdot 10^{-3} \pm 0,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3} \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-3}$	—	$n \cdot 10$
Er	$1,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,2 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3} \pm 0,6 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-3} \pm 4,3 \cdot 10^{-3}$	0,093 $\pm$ 0,086	$n \cdot 10$
Tm	$1,5 \cdot 10^{-3} \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-4} \pm 0,7 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-4} \pm 5,8 \cdot 10^{-4}$	—	—
Yb	$1,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-3} \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,4 \cdot 10^{-2}$	0,087 $\pm$ 0,081	—
Lu	$1,5 \cdot 10^{-3} \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4} \pm 0,8 \cdot 10^{-4}$	$10,3 \cdot 10^{-4} \pm 6,5 \cdot 10^{-4}$	0,013 $\pm$ 0,011	—
Hf	$2,4 \cdot 10^{-2} \pm 0,4 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,2 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2} \pm 1,1 \cdot 10^{-2}$	0,24 $\pm$ 0,23	$n \cdot 10^{-3}$
Ta	$3,6 \cdot 10^{-3} \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3} \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-2} \pm 1,8 \cdot 10^{-2}$	—	$n \cdot 10^{-3}$
W	$1,9 \cdot 10^{-2} \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2} \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2} \pm 2,0 \cdot 10^{-2}$	—	$n \cdot 10^{-2}$
Pb	1,6 $\pm$ 0,2	0,07 $\pm$ 0,01	0,77 $\pm$ 0,45	6,44 $\pm$ 5,98	n
Th	$2,2 \cdot 10^{-2} \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2} \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2} \pm 1,5 \cdot 10^{-2}$	0,41 $\pm$ 0,35	—
U	$0,9 \cdot 10^{-2} \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-3} \pm 0,4 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$	0,10 $\pm$ 0,09	$8 \cdot 10^{-3}$

Для определения вклада различных источников в формирование элементного состава лишайников были рассчитаны коэффициенты обогащения (enrichment factors – EF) относительно среднего состава континентальной земной коры по формуле (1):

$$EF = \frac{El_{sample} \cdot Al_{crust}}{Al_{sample} \cdot El_{crust}}, \quad (1)$$

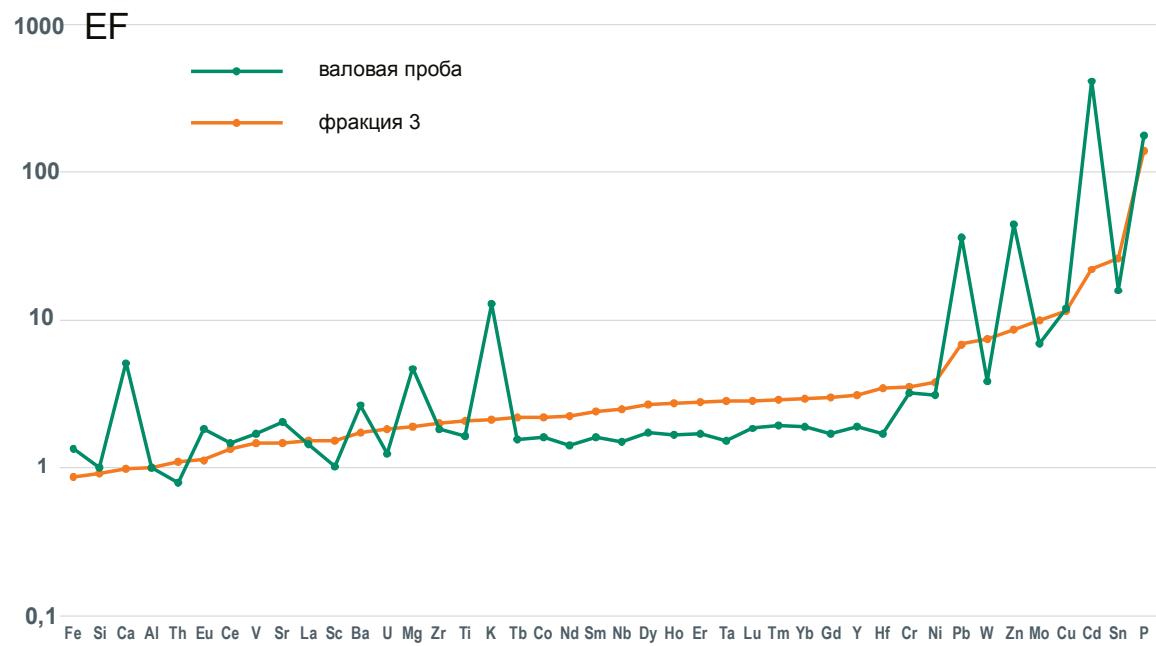
где El, Al – содержания химического элемента и алюминия в валовой пробе лишайника или в 3 фракции и в верхней части континентальной земной коры [53].

Для большинства элементов значения EF для валовых проб и 3 фракции либо не превышают 10, либо превышают незначительно (рис. 1). В валовых пробах для ряда элементов EF значительно выше 10 по различным причинам. Главной причиной высоких значений EF для

Zn и Pb являются их биофильность, причем в случае фосфора – биологически значимого макроэлемента – высокие значения EF характерны и для 3 фракции. Значения EF для Pb и Cd в валовой пробе и в 3 фракции указывают на особенности распределения элементов по пылевой и биологическим фракциям лишайника.

Все изученные элементы распределяются на две большие группы по характерным признакам распределения по фракциям биомассы лишайника. В первую группу входят Nb, Mo, Nd, Hf, Ta, W, Th, U, Sn и REE (Sc, Y, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu). В первой группе содержания элементов в валовых пробах и в материале фракции 3 различаются только в пределах погрешности измерения (табл. 1). Элементы этой группы не фиксируются (не связываются) в пылевой

фракции и во фракциях 2 и 3. Таким образом, эти элементы не подвержены биологическому воздействию лишайников, т. е. не растворяются на поверхности и в теле лишайника под воздействием биохимических процессов в организме лишайника. Судя по всему, эти элементы в форме пыли из атмосферных выпадений захватываются лишайником по мере разрастания таллома и остаются внутри него в неизменном виде. Поступление из субстрата маловероятно, так как в эксперименте использовалась только верхняя часть таллома, а переноса элементов, связанных с субстратом, вверх по таллому не происходит [6, 54]. При отмирании биомассы эти элементы должны поступить в окружающую среду в тех же формах, в которых они выпали на планшет.



**Рис. 1. Коэффициенты обогащения**  
**Fig. 1. Enrichment factors**

Во вторую группу входят Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Zr, Cd, Ba, La, Ce, Eu, Pb. Эта группа имеет ряд отличий от первой. Все входящие в нее элементы менееочно прочно связаны с поверхностью лишайника и в той или иной степени смываются в пылевую фракцию, т. е. подвержены воздействию осадков. В большинстве случаев малая степень смыва элемента соответствует прочной фиксации элемента в биомассе, когда элемент преобладает во фракции 3 (рис. 2). К таким элементам относятся как биогенные Co, Ni, Cu, P, Si, так и небиогенные Cr, Zr, Ti, La, Al, Ce и V, доля которых в фракции 3 составляет от 54 до 86 %. Механизм накопления биогенных и небиогенных элементов различен: в первом случае это обусловлено метаболизмом клетки, т. е. элементы входят в состав химических соединений клетки; во втором случае большее значение имеет механический захват пылевых выпадений. В то же время все эти элементы в той или иной степени фиксируются и в смывах пылевой фракции (7–26 %), и в 1 фракции (4–21 %), и в 2 фракции (3–16 %).

В некоторых случаях степень смыва элемента в пылевую фракцию не зависит от прочности фиксации элемента биомассой. К примеру, Cd и Pb достаточно средне смываются с лишайника (12 и 23 % соответственно), но в то же время основная часть этих элементов фиксируется в легкоподвижной фракции 1 (72 и 57 % соответственно). Кадмий и свинец не являются биогенными элементами, однако легко накапливаются лишайниками [55].

Биогенные макроэлементы (Ca, Zn, K, Mg, Fe) в составе пылевых выпадений могут подвергаться химическому воздействию со стороны лишайника, переходя в подвижные фракции, из-за чего их доля в подвижной фракции выше, чем у других элементов. Так, доля K в пылевой фракции достигает 58 % от концентрации элемента в валовой пробе. Значительное преобладание K во 2 фракции (22 %) обусловлено работой K-Na насоса, который обеспечивает градиент концентраций внутри клетки. Похожая картина наблюдается для цинка. Этот элемент легкорастворим, высокоподвижен в процессах выветривания и играет

важнейшую роль в метаболизме живых клеток [55], что обуславливает его заметное присутствие в смыках пылевой фракции (41 %) и подвижных фракциях биомассы (27 и 18 %). К этой же группе можно отнести Ba, который обладает высокой степенью биогенности [52]: доля в пылевой фракции минимальна (3 %), в то время как в биомассе его присутствие наблюдается в основном во 2 (40 %) и 3 (44 %) фракциях.

Помимо стабильных элементов, мы рассматривали распределение по биологическим фракциям трех изотопов:  $^{7}\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ . Естественные изотопы  $^{7}\text{Be}$  и  $^{210}\text{Pb}$  образуются в атмосфере и являются индикаторами атмосферных выпадений. Поступление искусственного изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в лишайники в настоящее время возможно только в связи с вторичным перераспределением через процесс выветривания.

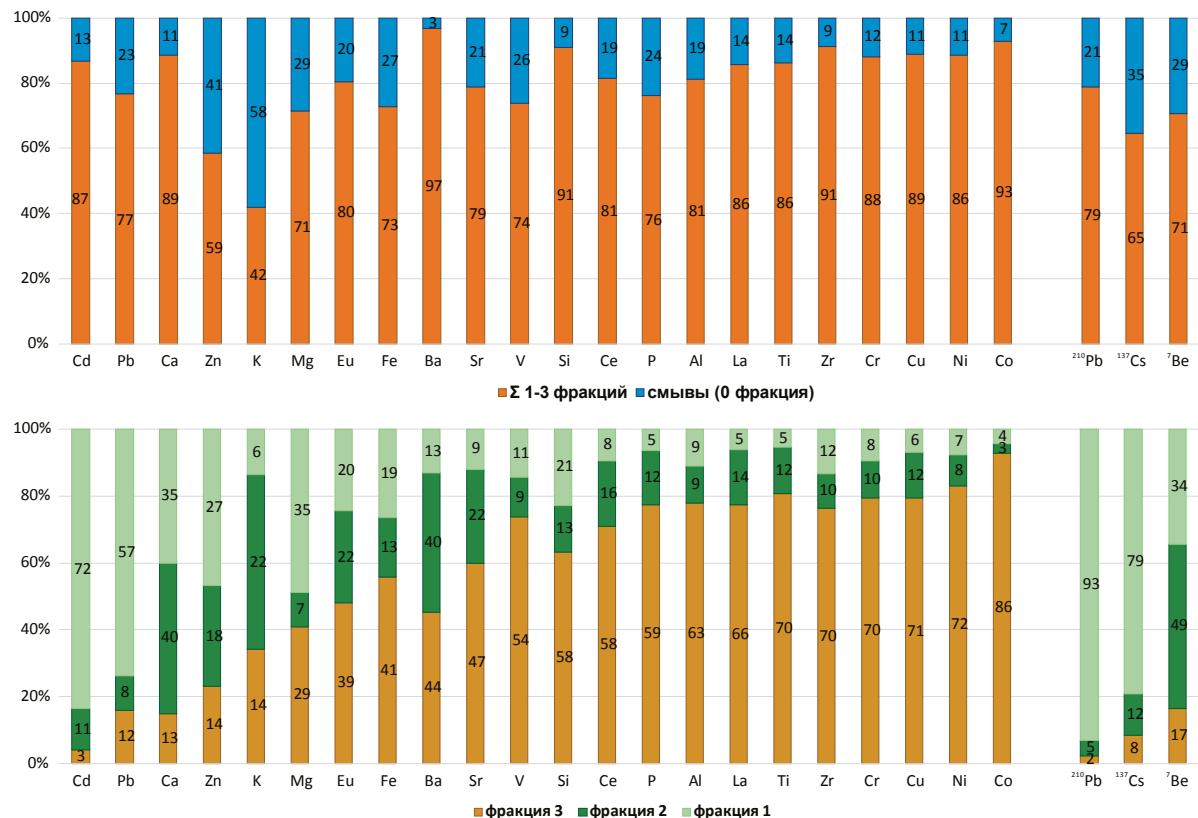


Рис. 2. Распределение элементов и изотопов между пылевой фракцией и фракциями биомассы  
 Fig. 2. Distribution of elements and isotopes between the washoff and lichen biomass fractions

Заметная доля  $^{7}\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , поступивших на поверхность лишайника из атмосферы, не связывается с биомассой и остается в пылевой фракции (20–35 %). Изотопы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  концентрируются в основном во фракции 1. Для  $^{137}\text{Cs}$  доля во фракции 1 составляет 79 %, для  $^{210}\text{Pb}$  – 93 %. На долю фракции 2 приходится 12 % изотопа  $^{137}\text{Cs}$  и 5 % изотопа  $^{210}\text{Pb}$ ; во фракции 3 содержится 8 %  $^{137}\text{Cs}$  и 2 %  $^{210}\text{Pb}$ . Природа такого распределения, несмотря на схожесть, различна. Изотоп  $^{137}\text{Cs}$ , как химический аналог калия, может легко попадать во внутриклеточное пространство с помощью специфических переносчиков ионов  $\text{K}^{+}$ , однако его распределение значительно отличается от распределения калия. Свинец, хотя и может достаточно легко попадать внутрь клеток, оказывает значительное токсическое влияние, которое выражается в изменении проницаемости клеточных мембран [55, 56] из-за воздействия на липиды, из которых они состоят, и воздействия на активность встроенных в них энзимов [57], из-за чего проницаемость клеточной стенки для ионов Pb снижается. Распределение стабильного Pb и  $^{210}\text{Pb}$  в целом схожи.

Таблица 2. Удельные активности изотопов в лишайнике ( $n=4$ ),  $\text{Бк}/\text{кг}$  сухого веса

Table 2. Isotopes specific activity in lichen ( $n=4$ ),  $\text{Bq}/\text{kg}$  dry weight

изотоп isotope	min	max	среднее mean	ст. откл. std.dev.
$^{7}\text{Be}$	290	630	460	125
$^{137}\text{Cs}$	12	35	20	7
$^{210}\text{Pb}$	410	460	430	16

Изотоп  $^{7}\text{Be}$  распределяется примерно поровну между фракциями 1 и 2 (34 и 49 %). Бериллий имеет малый ионный радиус, позволяющий ему поступать внутрь клетки с помощью переносчиков ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , чьим химическим аналогом он является. Принимая во внимание период полураспада изотопа  $^{7}\text{Be}$ , можно утверждать, что процесс поступления бериллия в клетку происходит с достаточно высокой скоростью. Одним из объяснений может служить высокое сродство бериллия к фосфатным группам и активным центрам в АТФ (аденозинтрифосфорная кислота) и АДФ (аденозиндифосфорная кислота), которые являются универсальными источниками энергии

для всех биохимических процессов [55, 56]. С фракцией 3 связано 17 % поступившего в клетку  $^{7}\text{Be}$ .

### Заключение

Содержания микро- и макроэлементов в лишайниках из изученного района ЯНАО не показывают наличие значительного антропогенного воздействия.

Часть поступивших на поверхность лишайников элементов прочно связывается с биомассой, не подвергается химическому воздействию со стороны лишайников, не смывается с пылевой фракцией и при отмирании биомассы должна поступать в окружающую среду в неизменных формах.

Другая часть элементов менее прочно связана с биомассой, в различной степени остается в пылевой

фракции, в различной степени переходит в непрочно связанные формы (внеклеточная и внутриклеточная фракции). Максимально в непрочно связанные формы переходят биогенные элементы (Ca, Zn, K, Mg, Fe) и поллютанты (Cd, Pb). Сходный характер распределения в биомассе лишайников наблюдается для изотопов  $^{7}\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ .

*Исследование выполнено при частичной поддержке гранта РНФ № 18-77-10039 (экспедиционные и аналитические работы). Исследования, связанные с адаптацией методики фракционирования биомассы для лишайников, выполнены в рамках государственного задания ИГМ СО РАН. Аналитические работы проводились в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review // *Science of Total Environment*. – 2016. – V. 572. – P. 216–231.
2. Agnan Y., Séjalon-Delmas N., Probst A. Origin and distribution of rare earth elements in various lichen and moss species over the last century in France // *Science of Total Environment*. – 2014. – V. 487. – № 1. – P. 1–12.
3. Origin and fluxes of atmospheric REE entering an ombrotrophic peat bog in Black Forest (SW Germany): Evidence from snow, lichens and mosses / D. Aubert, G. Le Roux, M. Krachler, A. Cheburkin, B. Kober, W. Shotyk, P. Stille // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2006. – V. 70. – № 11. – P. 2815–2826.
4. Mosses and lichens as biomonitor of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy / R. Bargagli, F. Monaci, F. Borghini, F. Bravi, C. Agnorelli // *Environmental Pollution*. – 2002. – V. 116. – № 2. – P. 279–287.
5. Use of geochemical signatures, including rare earth elements, in mosses and lichens to assess spatial integration and the influence of forest environment / L. Gandois, Y. Agnan, S. Leblond, N. Séjalon-Delmas, G. Le Roux, A. Probst // *Atmospheric Environment*. – 2014. – V. 95. – P. 96–104.
6. Garty J. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: theory and application // *Critical Reviews in Plant Sciences*. – 2001. – V. 20. – № 4. – P. 309–371.
7. Comparison of plant and precipitation chemistry in catchments with different levels of pollution on the Kola Peninsula, Russia / C. Reimann, J.H. Halleraker, G. Kashulina, I. Bogatyrev // *Science of the Total Environment*. – 1999. – V. 243–244. – P. 169–191.
8. Schutte J.A. Chromium in two corticolous lichens from Ohio and West Virginia // *The Bryologist*. – 1977. – V. 80. – № 2. – P. 279–283.
9. Large scale air monitoring: lichen vs. air particulate matter analysis / M. Rossbach, R. Jayaseker, G. Kniewald, N.H. Thang // *Science of the Total Environment*. – 1999. – V. 232. – № 1–2. – P. 59–66.
10. Malikova I., Strakhovenko V., Shcherbov B. Distribution of radionuclides in moss-lichen cover and needles on the same grounds of landscape-climatic zones of Siberia // *Journal of the Environmental Radioactivity*. – 2019. – V. 198. – P. 64–78.
11. Active biomonitoring of atmospheric pollution in the Western Cape (South Africa) using INAA and ICP-MS / N.B. Ndlovu, M.V. Frontasyeva, R.T. Newman, P.P. Maleka // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2019. – V. 322. – № 3. – P. 1549–1559.
12. Bargagli R., Sanchez-Hernandez J.C., Monaci F. Baseline concentrations of elements in the antarctic macrolichen *Umbilicaria decussata* // *Chemosphere*. – 1999. – V. 38. – № 3. – P. 475–487.
13. Grodzińska K., Godzik B., Bieńkowski P. *Cladina stellaris* (Opiz) Brodo as a bioindicator of atmospheric deposition on the Kola Peninsula, Russia // *Polar Research*. – 1999. – V. 18. – № 1. – P. 105–110.
14. Nash T.H., Gries C. The use of lichens in atmospheric deposition studies with an emphasis on the Arctic // *Science of the Total Environment*. – 1995. – V. 160–161. – № C. – P. 729–736.
15. Riget F., Asmund G., Aastrup P. The use of lichen (*Cetraria nivalis*) and moss (*Racomitrium lanuginosum*) as monitors for atmospheric deposition in Greenland // *Science of the Total Environment*. – 2000. – V. 245. – № 1–3. – P. 137–148.
16. Nash T.H., Gries C. The response of lichens to atmospheric deposition with an emphasis on the Arctic // *Science of the Total Environment*. – 1995. – V. 160–161. – № C. – P. 737–747.
17. Simonetti A., Gariépy C., Carignan J. Tracing sources of atmospheric pollution in Western Canada using the Pb isotopic composition and heavy metal abundances of epiphytic lichens // *Atmospheric Environment*. – 2003. – V. 37. – № 20. – P. 2853–2865.
18. Pb isotopes as tracers of mining-related Pb in lichens, seaweed and mussels near a former Pb-Zn mine in West Greenland / J. Søndergaard, G. Asmund, P. Johansen, B. Elberling // *Environmental Pollution*. – 2010. – V. 158. – № 5. – P. 1319–1326.
19. Геохимия эпигейных лишайников водосборного бассейна Белого моря / В.П. Шевченко, О.С. Покровский, Д.П. Стародымова, Е.В. Васюкова, А.П. Лисицын, С.И. Дровнина, Н.С. Замбер, Н.М. Махнович, А.С. Саввичев, Й. Сонке // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 450. – № 1. – С. 514–520.
20. Nieboer E., Richardson D.H.S., Tomassini F.D. Mineral uptake and release by lichens: an overview // *The Bryologist*. – 1978. – V. 81. – № 2. – P. 226–246.
21. Carignan J., Sonke J. The effect of atmospheric mercury depletion events on the net deposition flux around Hudson Bay, Canada // *Atmospheric Environment*. – 2010. – V. 44. – № 35. – P. 4372–4379.
22. Heavy metal contamination in the Taimyr Peninsula, Siberian Arctic / S. Allen-Gil, J. Ford, B.K. Lasorsa, M. Monetti, T. Vlasova, D.H. Landers // *Science of The Total Environment*. – 2003. – V. 301. – № 1–3. – P. 119–138.
23. France R., Coquery M. Lead concentrations in lichens from the Canadian high arctic in relation to the latitudinal pollution gradient // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 1996. – V. 90. – № 3–4. – P. 469–474.
24. Multi-element and rare earth element composition of lichens, mosses, and vascular plants from the Central Barrenlands, Nunavut, Canada / J. Chiarenzelli, L. Aspler, C. Dunn, B. Cousins, D. Ozarko, K. Powis // *Applied Geochemistry*. – 2001. – V. 16. – № 2. – P. 245–270.
25. The ecological impact of mineral exploitation in the Russian Arctic: A field-scale study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in permafrost-affected soils and lichens of the Yamal-Nenets autonomous region / X. Ji, E. Abakumov, V. Polyako, X. Xie, W. Dongyang // *Environmental Pollution*. – 2019. – V. 255. – P. 113239.
26. Walker T.R. Zinc accumulation in lichens due to industrial emissions around Vorkuta, northeast European Russia // *Polish Polar Research*. – 2008. – V. 29. – № 2. – P. 141–147.
27. An assessment of pollution impacts due to the oil and gas industries in the Pechora basin, north-eastern European Russia /

- T.R. Walker, P.D. Crittenden, S.D. Young, T. Prystina // Ecological Indicators. – 2006. – V. 6. – № 2. – P. 369–387.
28. Long-term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr Peninsula (Russian Federation) North of the Norilsk Industrial Complex / A.V. Zhulidov, R.D. Robarts, D.F. Pavlov, J. Kämäri, T.Yu. Gurtovaya, J.J. Meriläinen, I.N. Pospelov // Environmental Monitoring and Assessment. – 2011. – V. 181. – № 1–4. – P. 539–553.
29. Paatero J., Salminen-Paatero S. Transfer of transuranium elements along the food chain lichen-reindeer-man – a review of investigations in Finnish Lapland // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – V. 212. – P. 106126.
30. Modelling of long-term behaviour of caesium and strontium radionuclides in the Arctic environment and human exposure / V. Golikov, I. Logacheva, G. Bruk, V. Shutov, M. Balonov, P. Strand, S. Borghuis, B. Howard, S. Wright // Journal of Environmental Radioactivity. – 2004. – V. 74. – № 1–3. – P. 159–169.
31. Spatial and temporal trends of contaminants in Canadian Arctic freshwater and terrestrial ecosystems: a review / B. Braune, D. Muir, B. DeMarch, M. Gamberg, K. Poole, R. Currie, M. Dodd, W. Duschenko, J. Eamer, B. Elkin, M. Evans, S. Grundy, C. Hebert, R. Johnstone, K. Kidd, B. Koenig, L. Lockhart, H. Marshall, K. Reimer, J. Sanderson, L. Shutt // Science of The Total Environment. – 1999. – V. 230. – № 1–3. – P. 145–207.
32.  $^{90}\text{Sr}$  level and behaviour in the terrestrial environment of Spitsbergen / A. Cwanek, E. Łokas, Ch. Nguyen Dinh, P. Zagórski, Sh.M. Singh, K. Szufa, E. Tomankiewicz // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2021. – V. 327. – № 1. – P. 485–494.
33. Sources and variation of isotopic ratio of airborne radionuclides in Western Arctic lichens and mosses / A. Cwanek, J.W. Mietelski, E. Łokas, M.A. Olech, R. Anczkiewicz, R. Misiak // Chemosphere. – 2020. – V. 239. – P. 124783.
34. Airborne radionuclides and heavy metals in high Arctic terrestrial environment as the indicators of sources and transfers of contamination / E. Łokas, A. Zaborska, I. Sobota, P. Gaca, J.A. Milton, P. Kocurek, A. Cwanek // The Cryosphere. – 2019. – V. 13. – № 7. – P. 2075–2086.
35. Uptake of radionuclides by vegetation at a High Arctic location / M. Dowdall, J.P. Gwynn, C. Moran, J. O'Dea, C. Davids, B. Lind // Environmental Pollution. – 2005. – V. 133. – № 2. – P. 327–332.
36. Nifontova M. Radionuclides in the moss-lichen cover of tundra communities in the Yamal Peninsula // Science of the Total Environment. – 1995. – V. 160–161. – P. 749–752.
37. Impact of distance from the glacier on the content of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the lichen *Cetrariella delisei* / M. Saniewski, P. Wietrzyk-Pelka, T. Zalewska, P. Oszyczka, M.H. Węgrzyn // Chemosphere. – 2020. – V. 259. – P. 127433.
38. Bryophytes and lichens as fallout originated radionuclide indicators in the Svalbard archipelago (High Arctic) / M. Saniewski, P. Wietrzyk-Pelka, T. Zalewska, M. Olech, M.H. Węgrzyn // Polar Science. – 2020. – V. 25. – P. 100536.
39. Beckett R.P., Brown D.H. The control of cadmium uptake in the lichen genus *Peltigera* // Journal of Experimental Botany. – 1984. – V. 35. – № 7. – P. 1071–1082.
40. Brown D.H., Avalos A. Chemical control of cadmium uptake by *Peltigera* // Symbiosis. – 1991. – V. 11. – № 2–3. – P. 299–311.
41. Brown D.H., Slingsby D.R. The cellular location of lead and potassium in the lichen *Cladonia Rangiformis* (L.) Hoffm. // New Phytologist. – 1972. – V. 71. – № 2. – P. 297–305.
42. A search for an extracellular extractant of Hg for use in the sequential elution technique with *Pseudoscleropodium purum* / A. Pérez-Llamazares, J.A. Fernández, J.R. Aboal, A. Carballera // Journal of Bryology. – 2009. – V. 31. – № 1. – P. 23–29.
43. Sources and accumulation of Be, Pb and Cs isotopes in the annual needles of larch and cedar in Novy Urengoy region (Arctic part of Western Siberia) / D. Belyanin, Yu. Vosel, K. Mezina, M. Melgunov, M. Kropacheva, B. Shcherbov, M. Rubanov, I. Zhurkova // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – P. 3–7.
44. Radioisotope  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  in the needles of larch and cedar in the Novy Urengoy region (Arctic part of Western Siberia) / D. Belyanin, Yu. Vosel, K. Mezina, M. Melgunov, M. Kropacheva, B. Shcherbov, M. Rubanov, I. Zhurkova // Applied Geochemistry. – 2021. – V. 124. – P. 104822.
45. Mezina K., Melgunov M., Belyanin D.  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in snow deposits in the Arctic part of Western Siberia (Yamal-Nenets Autonomous District) // Atmosphere. – 2020. – V. 11. – № 8. – P. 825–845.
46. Accumulation of natural radionuclides ( $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) and micro-elements in mosses, lichens and cedar and larch needles in the Arctic Western Siberia / Yu. Vosel, D. Belyanin, M. Melgunov, S. Vosel, K. Mezina, M. Kropacheva, I. Zhurkova, B. Shcherbov // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – V. 28. – № 3. – P. 2880–2892.
47. Kropacheva M., Melgunov M., Makarova I. The artificial and natural isotopes distribution in sedge (*Carex L.*) biomass from the Yenisei River flood-plain: adaptation of the sequential elution technique // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 167. – P. 180–187.
48. Modelling the extra and intracellular uptake and discharge of heavy metals in *Fontinalis antipyretica* transplanted along a heavy metal and pH contamination gradient / J.A. Fernández, M.D. Vázquez, J. López, A. Carballera // Environmental Pollution. – 2006. – V. 139. – № 1. – P. 21–31.
49. Effects of water acidity and metal concentration on accumulation and within-plant distribution of metals in the aquatic bryophyte *Fontinalis antipyretica* / M.D. Vázquez, J.A. Fernández, J. López, A. Carballera // Water, Air, & Soil Pollution. – 2000. – V. 120. – № 1. – P. 1–20.
50. Vázquez M.D., López J., Carballera A. Uptake of heavy metals to the extracellular and intracellular compartments in three species of aquatic bryophyte // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 1999. – V. 44. – № 1. – P. 12–24.
51. Vázquez M.D., López J., Carballera A. Modification of the sequential elution technique for the extraction of heavy metals from bryophytes // Science of the Total Environment. – 1999. – V. 241. – № 1–3. – P. 53–62.
52. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Справочник: в 6 кн. Кн. 1: с-элементы. – М.: Недра, 1994. – 304 с.
53. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. V. 3. The Crust. Amsterdam. – N.Y.: Elsevier Ltd, 2003. – 64 p.
54. Analysis of lichen thin sections by PIXE and STIM using a proton microprobe / B. Clark, N.F. Mangelson, L.L. St. Clair, J.S. Gardner, L.S. Cooper, L.B. Rees, P.G. Grant, G.S. Bench // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1999. – V. 150. – № 1–4. – P. 248–253.
55. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants: fourth ed. – Boca Raton: Taylor and Francis Group, LLC, 2011. – 505 p.
56. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants: an overview. 3<sup>rd</sup> ed. – Boca Raton, USA: CRC Press LLC, 2001. – 331 p.
57. Heavy metals: biological importance and detoxification strategies / M. Oves, K.M. Saghir, Q.A. Huda, F.M. Nadeen, T. Almeelbi // Journal of Bioremediation & Biodegradation. – 2016. – V. 7. – № 2. – P. 1–15.

Поступила 04.05.2022 г.

## Информация об авторах

**Кропачева М.Ю.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии Института геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева.

**Восель Ю.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии Института геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева.

**Мезина К.А.**, младший научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии Института геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева.

**Белянин Д.К.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии благородных и редких элементов Института геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева.

**Мельгунов М.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии Института геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева.

**Макарова И.В.**, ведущий инженер лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии Института геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева.

UDC 550.47:550.424.6

## DISTRIBUTION OF ISOTOPES, MACRO- AND MICROELEMENTS FROM ATMOSPHERIC FALLOUT IN LICHENS OF ARCTIC ZONE OF WESTERN SIBERIA – FIRST DATA

**Marya Yu. Kropacheva<sup>1</sup>,**  
marya@igm.nsc.ru

**Yulia S. Vosel<sup>1</sup>,**  
vosel@igm.nsc.ru

**Ksenia A. Mezina<sup>1</sup>,**  
mezinaka@igm.nsc.ru

**Dmitry K. Belyanin<sup>1</sup>,**  
bel@igm.nsc.ru

**Mikhail S. Melgunov<sup>1</sup>,**  
mike@igm.nsc.ru

**Irina V. Makarova<sup>1</sup>,**  
makarova@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,  
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the study is determined by the beginning of active industrial development of Russia's Arctic territories. For a correct assessment of anthropogenic impact, it is necessary to know the regional levels of geochemical background, as well as the pathways of atmospheric transport of substance. Lichens are widely used as bioindicators not only of anthropogenic pollution, but also of significant natural processes, for example, local or global atmospheric transport and biogeochemical processes of redistribution of elements.

**The main aim:** to determine the concentrations of micro- and macroelements (Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Zr, Cd, Ba, La, Ce, Eu, Pb, Nb, Mo, Nd, Hf, Ta, W, Th, U, Sn, REE), natural and artificial isotopes ( $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) in lichens and their distribution between lichens biomass fractions.

**Objects:** lichens from foresttundra of the Arctic zone of Western Siberia: Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Novy Urengoy region.

**Methods:** sequential elution techniques for lichen biomass with separation of four fractions; stable elements determination – ICP-AES and ICP-MS; natural and artificial isotopes determination – gamma-spectrometry with using well detector.

**Results.** The concentrations of micro- and macroelements in lichens show no significant anthropogenic impact. The elements are divided into two large groups according to their characteristic distribution among the lichen biomass fractions. In the first group, elements are firmly bound to lichen biomass through the mechanical capture of dust particles from atmospheric deposition. Elements from the second group are physicochemically affected by the lichen and are distributed to varying degrees throughout the lichen biomass fractions.

### Key words:

$^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , macro- and microelements, lichen, SET, atmospheric fallout, Arctic.

The study was carried out by the grant from the Russian Science Foundation (project no. 18-77-10039) (field and analytical studies). Part of the work related to the sequential elution technique customization for lichen was carried out within the framework of the state assignment of the IGM SB RAS with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The analytical studies of samples were performed in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS.

### REFERENCES

1. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review. *Science of Total Environment*, 2016, vol. 572, pp. 216–231.
2. Agnan Y., Séjalon-Delmas N., Probst A. Origin and distribution of rare earth elements in various lichen and moss species over the last century in France. *Science of Total Environment*, 2014, vol. 487 (1), pp. 1–12.
3. Aubert D., Le Roux G., Krachler M., Cheburkin A., Kober B., Shotyk W., Stille P. Origin and fluxes of atmospheric REE entering an ombrotrophic peat bog in Black Forest (SW Germany): Evidence from snow, lichens and mosses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, vol. 70 (11), pp. 2815–2826.
4. Bargagli R., Monaci F., Borghini F., Bravi F., Agnorelli C. Mosses and lichens as biomonitor of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 116 (2), pp. 279–287.
5. Gandois L., Agnan Y., Leblond S., Séjalon-Delmas N., Le Roux G., Probst A. Use of geochemical signatures, including rare earth elements, in mosses and lichens to assess spatial integration and the influence of forest environment. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 95, pp. 96–104.
6. Garty J. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: theory and application. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2001, vol. 20 (4), pp. 309–371.
7. Reimann C., Halleraker J.H., Kashulina G., Bogatyrev I. Comparison of plant and precipitation chemistry in catchments with different levels of pollution on the Kola Peninsula, Russia. *Science of the Total Environment*, 1999, vol. 243–244, pp. 169–191.
8. Schutte J.A. Chromium in two corticolous lichens from Ohio and West Virginia. *The Bryologist*, 1977, vol. 80 (2), pp. 279–283.
9. Rossbach M., Jayasekera R., Kniwald G., Thang N.H. Large scale air monitoring: Lichen vs. air particulate matter analysis. *Science of the Total Environment*, 1999, vol. 232 (1–2), pp. 59–66.

10. Malikova I., Strakhovenko V., Shcherbov B. Distribution of radionuclides in moss-lichen cover and needles on the same grounds of landscape-climatic zones of Siberia. *Journal of the Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 198, pp. 64–78.
11. Ndlovu N.B., Frontasyeva M.V., Newman R.T., Maleka P.P. Active biomonitoring of atmospheric pollution in the Western Cape (South Africa) using INAA and ICP-MS. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2019, vol. 322 (3), pp. 1549–1559.
12. Bargagli R., Sanchez-Hernandez J.C., Monaci F. Baseline concentrations of elements in the antarctic macrolichen *Umbilicaria decussata*. *Chemosphere*, 1999, vol. 38 (3), pp. 475–487.
13. Grodzińska K., Godzik B., Bieńkowski P. *Cladina stellaris* (Opiz) Brodo as a bioindicator of atmospheric deposition on the Kola Peninsula, Russia. *Polar Research*, 1999, vol. 18 (1), pp. 105–110.
14. Nash T.H., Gries C. The use of lichens in atmospheric deposition studies with an emphasis on the Arctic. *Science of the Total Environment*, 1995, vol. 160–161 (C), pp. 729–736.
15. Rige F., Asmund G., Aastrup P. The use of lichen (*Cetraria nivalis*) and moss (*Rhacomitrium lanuginosum*) as monitors for atmospheric deposition in Greenland. *Science of the Total Environment*, 2000, vol. 245 (1–3), pp. 137–148.
16. Nash T.H., Gries C. The response of lichens to atmospheric deposition with an emphasis on the Arctic. *Science of the Total Environment*, 1995, vol. 160–161 (C), pp. 737–747.
17. Simonetti A., Gariépy C., Carignan J. Tracing sources of atmospheric pollution in Western Canada using the Pb isotopic composition and heavy metal abundances of epiphytic lichens. *Atmospheric Environment*, 2003, vol. 37 (20), pp. 2853–2865.
18. Søndergaard J., Asmund G., Johansen P., Elberling B. Pb isotopes as tracers of mining-related Pb in lichens, seaweed and mussels near a former Pb-Zn mine in West Greenland. *Environmental Pollution*, 2010, vol. 158 (5), pp. 1319–1326.
19. Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Starodymova D.P., Vasyukova E.V., Lisitzin A.P., Drovina S.I., Zamber N.S., Makhnovich N.M., Savvichev A.S., Sonke J. Geochemistry of terricolous lichens in the White Sea catchment area. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 450 (1), pp. 514–520.
20. Nieboer E., Richardson D.H.S., Tomassini F.D. Mineral uptake and release by lichens: an overview. *The Bryologist*, 1978, vol. 81 (2), pp. 226–246.
21. Carignan J., Sonke J. The effect of atmospheric mercury depletion events on the net deposition flux around Hudson Bay, Canada. *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44 (35), pp. 4372–4379.
22. Allen-Gil S., Ford J., Lasorsa B.K., Monetti M., Vlasova T., Landers D.H. Heavy metal contamination in the Taimyr Peninsula, Siberian Arctic. *Science of the Total Environment*, 2003, vol. 301 (1–3), pp. 119–138.
23. France R., Coquery M. Lead concentrations in lichens from the Canadian high arctic in relation to the latitudinal pollution gradient. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1996, vol. 90 (3–4), pp. 469–474.
24. Chiarenzelli J., Aspler L., Dunn C., Cousens B., Ozarko D., Powis K. Multi-element and rare earth element composition of lichens, mosses, and vascular plants from the Central Barrenlands, Nunavut, Canada. *Applied Geochemistry*, 2001, vol. 16 (2), pp. 245–270.
25. Ji X., Abakumov E., Polyako V., Xie X., Dongyang W. The ecological impact of mineral exploitation in the Russian Arctic: A field-scale study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in permafrost-affected soils and lichens of the Yamal-Nenets autonomous region. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 255, p. 113239.
26. Walker T.R. Zinc accumulation in lichens due to industrial emissions around Vorkuta, northeast European Russia. *Polish Polar Research*, 2008, vol. 29 (2), pp. 141–147.
27. Walker T.R., Crittenden P.D., Young S.D., Prystina T. An assessment of pollution impacts due to the oil and gas industries in the Pechora basin, north-eastern European Russia. *Ecological Indicators*, 2006, vol. 6 (2), pp. 369–387.
28. Zhulidov A.V., Robarts R.D., Pavlov D.F., Kämäri J., Gurtovaya T.Yu., Meriläinen J.J., Pospelov I.N. Long-term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr Peninsula (Russian Federation) North of the Norilsk Industrial Complex. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, vol. 181 (1–4), pp. 539–553.
29. Paatero J., Salminen-Paatero S. Transfer of transuranium elements along the food chain lichen-reindeer-man – a review of investigations in Finnish Lapland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 212, p. 106126.
30. Golikov V., Logacheva I., Bruk G., Shutov V., Balonov M., Strand P., Borghuis S., Howard B., Wright S. Modelling of long-term behaviour of caesium and strontium radionuclides in the Arctic environment and human exposure. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, vol. 74 (1–3), pp. 159–169.
31. Braune B., Muir D., DeMarch B., Gamberg M., Poole K., Currie R., Dodd M., Duschenko W., Eamer J., Elkin B., Evans M., Grundy S., Hebert C., Johnstone R., Kidd K., Koenig B., Lockhart L., Marshall H., Reimer K., Sanderson J., Shutt L. Spatial and temporal trends of contaminants in Canadian Arctic freshwater and terrestrial ecosystems: a review. *Science of The Total Environment*, 1999, vol. 230 (1–3), pp. 145–207.
32. Cwanek A., Łokas E., Nguyen Dinh Ch., Zagórski P., Singh Sh.M., Szufa K., Tomankiewicz E.  $^{90}\text{Sr}$  level and behaviour in the terrestrial environment of Spitsbergen. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, vol. 327 (1), pp. 485–494.
33. Cwanek A., Mietelski J.W., Łokas E., Olech M.A., Anczkiewicz R., Misiak R. Sources and variation of isotopic ratio of airborne radionuclides in Western Arctic lichens and mosses. *Chemosphere*, 2020, vol. 239, pp. 124783.
34. Łokas E., Zaborska A., Sobota I., Gaca P., Milton J.A., Kocurek P., Cwanek A. Airborne radionuclides and heavy metals in high Arctic terrestrial environment as the indicators of sources and transfers of contamination. *The Cryosphere*, 2019, vol. 13 (7), pp. 2075–2086.
35. Dowdall M., Gwynn J.P., Moran C., O'Dea J., Davids C., Lind B. Uptake of radionuclides by vegetation at a High Arctic location. *Environmental Pollution*, 2005, vol. 133 (2), pp. 327–332.
36. Nifontova M. Radionuclides in the moss-lichen cover of tundra communities in the Yamal Peninsula. *Science of the Total Environment*, 1995, vol. 160–161, pp. 749–752.
37. Saniewski M., Wietrzyk-Pelka P., Zalewska T., Oszczak P., Węgrzyn M.H. Impact of distance from the glacier on the content of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the lichen *Cetraria delisei*. *Chemosphere*, 2020, vol. 259, p. 127433.
38. Saniewski M., Wietrzyk-Pelka P., Zalewska T., Olech M., Węgrzyn M.H. Bryophytes and lichens as fallout originated radionuclide indicators in the Svalbard archipelago (High Arctic). *Polar Science*, 2020, vol. 25, p. 100536.
39. Beckett R.P., Brown D.H. The control of cadmium uptake in the lichen genus *Peltigera*. *Journal of Experimental Botany*, 1984, vol. 35 (7), pp. 1071–1082.
40. Brown D.H., Avalos A. Chemical control of cadmium uptake by *Peltigera*. *Symbiosis*, 1991, vol. 11 (2–3), pp. 299–311.
41. Brown D.H., Slingsby D.R. The cellular location of lead and potassium in the lichen *Cladonia Rangiformis* (L.) Hoffm. *New Phytologist*, 1972, vol. 71 (2), pp. 297–305.
42. Pérez-Llamazares A., Fernández J.A., Aboal J.R., Carballeira A. A search for an extracellular extractant of Hg for use in the sequential elution technique with *Pseudoscleropodium purum*. *Journal of Bryology*, 2009, vol. 31 (1), pp. 23–29.
43. Belyanin D., Vosel Yu., Mezina K., Melgunov M., Kropacheva M., Shcherbov B., Rubanov M., Zhurkova I. Sources and accumulation of Be, Pb and Cs isotopes in the annual needles of larch and cedar in Novy Urengoy region (Arctic part of Western Siberia). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, pp. 3–7.
44. Belyanin D., Vosel Yu., Mezina K., Melgunov M., Kropacheva M., Shcherbov B., Rubanov M., Zhurkova I. Radioisotope  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  in the needles of larch and cedar in the Novy Urengoy region (Arctic part of Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, p. 104822.
45. Mezina K., Melgunov M., Belyanin D.  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in snow deposits in the Arctic part of Western Siberia (Yamal-Nenets Autonomous District). *Atmosphere*, 2020, vol. 11 (8), pp. 825–845.
46. Vosel Yu., Belyanin D., Melgunov M., Vosel S., Mezina K., Kropacheva M., Zhurkova I., Shcherbov B. Accumulation of natural radionuclides ( $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) and micro-elements in mosses, lichens and cedar and larch needles in the Arctic Western Siberia.

- Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 28 (3), pp. 2880–2892.
47. Kropacheva M., Melgunov M., Makarova I. The artificial and natural isotopes distribution in sedge (*Carex L.*) biomass from the Yenisei River flood-plain: adaptation of the sequential elution technique. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 167, pp. 180–187.
48. Fernández J.A., Vázquez M.D., López J., Carballera A. Modelling the extra and intracellular uptake and discharge of heavy metals in *Fontinalis antipyretica* transplanted along a heavy metal and pH contamination gradient. *Environmental Pollution*, 2006, vol. 139 (1), pp. 21–31.
49. Vázquez M.D., Fernández J.A., López J., Carballera A. Effects of water acidity and metal concentration on accumulation and within-plant distribution of metals in the aquatic bryophyte *Fontinalis antipyretica*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2000, vol. 120 (1), pp. 1–20.
50. Vázquez M.D., López J., Carballera A. Uptake of heavy metals to the extracellular and intracellular compartments in three species of aquatic bryophyte. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1999, vol. 44 (1), pp. 12–24.
51. Vázquez M.D., López J., Carballera A. Modification of the sequential elution technique for the extraction of heavy metals from bryophytes. *Science of the Total Environment*, 1999, vol. 241 (1–3), pp. 53–62.
52. Ivanov V.V. *Ecologicheskaya geokhimiya elementov. Spravochnik: v 6 kn. Kn. 1: s-elementy* [Environmental geochemistry of the elements. Handbook: in 6 vol. Vol. 1: s-elements]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 304 p.
53. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*. Vol. 3. The Crust. Amsterdam; N.Y., Elsevier Ltd, 2003. 64 p.
54. Clark B., Mangelson N.F., Clair L.L., Gardner J.S., Cooper L.S., Rees L.B., Grant P.G., Bench G.S. Analysis of lichen thin sections by PIXE and STIM using a proton microprobe. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1999, vol. 150 (1–4), pp. 248–253.
55. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants: fourth ed. Boca Raton, Taylor and Francis Group, LLC, 2011. 505 p.
56. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants: an overview. 3<sup>rd</sup> ed. Boca Raton, USA, CRC Press LLC, 2001. 331 p.
57. Oves M., Saghir K.M., Huda Q.A., Nadeen F.M., Almeelbi T. Heavy metals: Biological importance and detoxification strategies. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 2016, vol. 7 (2), pp. 1–15.

Received: 4 May 2022.

#### Information about the authors

- Marya Yu. Kropacheva**, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
- Yulia S. Vosel**, Cand. Sc., researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
- Ksenia A. Mezina**, junior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
- Dmitry K. Belyanin**, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
- Mikhail S. Melgunov**, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
- Irina V. Makarova**, leading engineer, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

УДК 681.5.017

## СИСТЕМА ПАРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

**Матвейкин Валерий Григорьевич<sup>1</sup>,**  
ipu\_tstu@mail.ru

**Краснянский Михаил Николаевич<sup>1</sup>,**  
tstu@tstu.ru

**Дмитриевский Борис Сергеевич<sup>1</sup>,**  
dmiboris@yandex.ru

**Василевский Константин Сергеевич<sup>1</sup>,**  
kvasilevskii@yandex.ru

<sup>1</sup> Тамбовский Государственный технический университет,  
Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106/5, пом. 2.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки и внедрения комплекса программно-технических средств – системы автоматизированного управления процессом пароснабжения – для осуществления оптимального управления энергетическими ресурсами – паром среднего и высокого давления. В настоящий момент система управления данным ресурсом представляет собой разрозненные локальные системы автоматизированного регулирования с обратной связью, осуществляющие стабилизацию параметров теплоносителя в момент подачи на установку. Исследование в данном направлении позволит сформировать централизованный подход к управлению технологическим процессом пароснабжения и улучшить технико-экономические показатели нефтеперерабатывающих производств.

**Цель:** разработка такой автоматизированной системы управления процессом пароснабжения, которая бы сократила потребление пара внешней выработки и максимально использовала внутренние ресурсы предприятия. В рамках реализации данной системы предполагается, что разрабатываемая автоматизированная система управления направлена на повышение энергоэффективности паропотребляющих производств.

**Объект:** система пароснабжения нефтеперерабатывающего предприятия, состоящая из последовательно и параллельно соединенных трубопроводами установок-потребителей и установок-генераторов пара среднего и высокого давления.

**Методы** исследования основаны на формировании математического описания установок, участвующих в технологическом процессе пароснабжения, вычислительной математики, теоретических основ автоматического управления, а также современных подходов в управлении технологическим процессом.

**Результаты.** Осуществлена декомпозиция технологического процесса пароснабжения в разрезе отдельных установок. Каждый элемент был рассмотрен как объект управления, для каждого из объектов управления определены векторы входных, выходных, промежуточных величин и возмущающего воздействия. На основе полученных данных предложен алгоритм управления процессом пароснабжения, определена структура системы управления и подобраны основные элементы комплекса программно-технических средств.

### Ключевые слова:

Система пароснабжения, система управления, пароконденсатный баланс, объект управления, пар высокого давления, пар среднего давления.

### Введение

В рамках рыночной экономики на данный момент особо актуальным направлением становится повышение энергоэффективности технологических производств [1] путем разработки и внедрения систем автоматизированного управления технологическими процессами [2, 3]. Построение системы, отвечающей строгим современным требованиям, невозможно без точной и адекватной модели технологического процесса, входящей в состав математического обеспечения системы управления [4, 5].

На нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях водяной пар используется в качестве основного теплоносителя. На производстве активно применяется пар высокого (ПВД) и среднего (ПСД) давления. Пар на технологических установках используется для нагрева нефтепродуктов, паротушения, распыла топлива и т. д.

Наиболее распространенные элементы нефтепереработки, участвующие в рассматриваемом технологическом процессе: установки каталитического крекинга (УКК), блоки каталитического риформирования серосодержащих газов (БКРСГ), установки стабилизации конденсата (УСК), установки каталитического реформинга (УКР), установки приготовления эмульсии и суспензии (УПЭС), установки первичной перегонки (АВТ) и другие [6].

На данный момент основная часть пара высокого и среднего давления генерируется внутри предприятия и распределяется между установками-потребителями. Теплота, вырабатываемая установками посредством котлов-утилизаторов преобразуется в водяной пар. При недостатке пара низкого давления происходит его подпитка из системы пара высокого давления с последующим редуцированием при помощи редукционно-охладительных установок (РОУ).

Недостающая часть пара поступает на производство с ТЭЦ по паропроводу. При поступлении на производство производится подпитка систем пара высокого и среднего давления.

Также на предприятии присутствует конденсатная система – конденсат с установок собирается посредством трубопроводов, производится очистка, и очищенный конденсат поступает в тепловые сети предприятия. Для распределения пара и конденсата между установками применяется протяженная система межхозяйственных трубопроводов различного диаметра.

#### Анализ технологического процесса и существующих систем контроля и управления

Установки, входящие в состав типового нефтеперерабатывающего технологического процесса, делятся на несколько групп по критерию потребления/генерации пара и конденсата:

- установки, производящие пар высокого давления;
- установки, потребляющие пар высокого и производящие пар среднего давления;
- установки, потребляющие пар высокого давления, производящие пар среднего давления и конденсат;
- установки, потребляющие пар высокого давления и производящие конденсат;
- установки, потребляющие пар среднего давления и производящие конденсат.

Балансовая пароконденсатная схема предприятия представлена на рис. 1.

Источники пара поддерживают заданное давление в системе пара высокого давления, излишки сбрасываются через редукционно-охладительную установку в систему среднего давления. На входе в каждую установку предусмотрен локальный редукционный узел, позволяющий скорректировать параметры пара, подаваемого на установку, в соответствии с технологическим регламентом.

В зависимости от температуры атмосферного воздуха присутствуют дополнительные потери температуры и давления пара на внешнем и внутреннем паропроводе, а также непосредственно в самих установках. Так как локальные редукционные узлы на входе каждой установки имеют идентичную структуру и комплекс программно-технических средств, для части установок производится управление температурой, а для части – давлением подаваемого на установку пара в соответствии с внешним температурным графиком.

На данный момент комплексная система управления процессом пароснабжения практически не реализована. В эксплуатацию введены только локальные автоматизированные системы, предназначенные для стабилизации давления и температуры пара на входе в каждую установку [7].

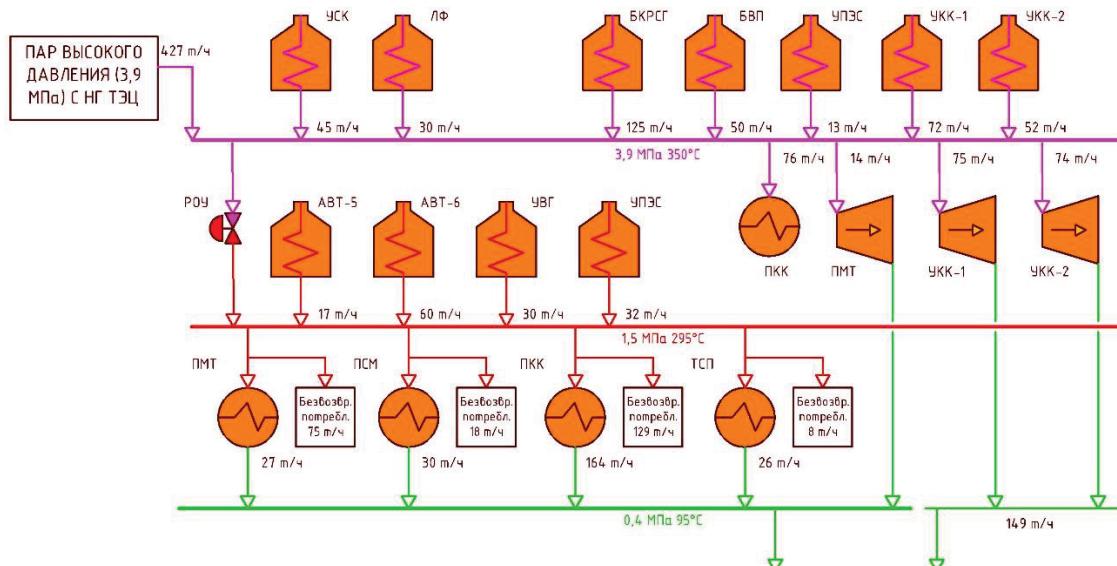


Рис. 1. Балансовая пароконденсатная схема предприятия  
 Fig. 1. Steam and condensate balance scheme of the plant

Данное решение имеет большое количество недостатков:

- 1) локальные системы автоматизированного управления на установках-потребителях, осуществляющие стабилизацию давления пара на входе, не позволяют достичь необходимого качества регулирования: при определенных режимах функционирования системы невозможно обеспечить некоторые установки паром с требуемыми параметрами;
- 2) в непрерывном процессе возникает необходимость перераспределения мощностей установок-генераторов и установок-потребителей в реальном времени для обеспечения непрерывности работы производства;
- 3) в непрерывном процессе возникает необходимость в адаптации локальных автоматизированных узлов к погодным, сезонным условиям;
- 4) в случае аварийных и нештатных ситуаций отсутствует возможность дистанционного обнаружения

- аварии и автоматического вывода установки/участка из эксплуатации по аварийному алгоритму;
- 5) существующая система пара высокого давления более чем на 30 % зависит от внешнего энергетического ресурса, причем существующие мощности установок-производителей пара способны на 100 % обеспечить потребность предприятия в остром паре при условии оптимального парораспределения.

Оптимизация системы пароснабжения требуется при решении следующих задач:

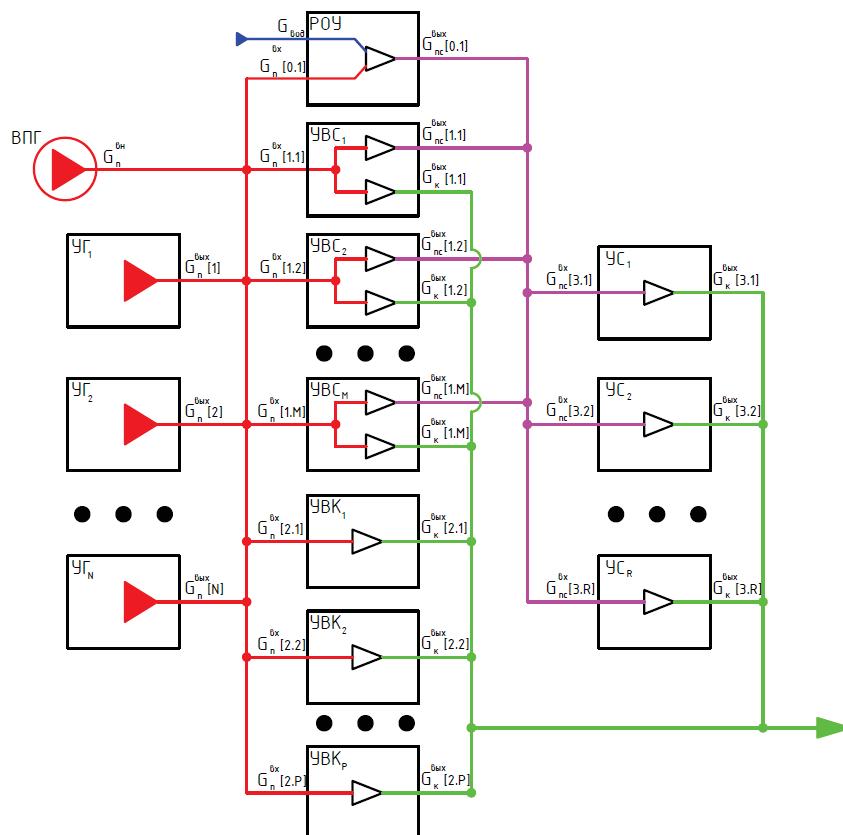


Рис. 2. Структурная схема парораспределения: ВПГ – внешний паровой генератор; УГ<sub>1</sub>..УГ<sub>N</sub> – установки, производящие пар высокого давления; УВС<sub>1</sub>..УВС<sub>M</sub> – установки, потребляющие пар высокого давления и производящие пар среднего давления и конденсат; УВК<sub>1</sub>..УВК<sub>P</sub> – установки, потребляющие пар высокого давления и производящие конденсат; УС<sub>1</sub>..УС<sub>R</sub> – установки, потребляющие пар среднего давления и производящие конденсат; РОУ – редукционно-охладительная установка

Fig. 2. Block diagram of steam distribution: ВПГ – external steam generator; УГ<sub>1</sub>..УГ<sub>N</sub> – plant-producers of high-pressure steam; УВС<sub>1</sub>..УВС<sub>M</sub> – plants that consume high-pressure steam, produce medium-pressure steam and condensate; УВК<sub>1</sub>..УВК<sub>P</sub> – plants that consume high-pressure steam, produce condensate; УС<sub>1</sub>..УС<sub>R</sub> – plants that consume medium-pressure steam, produce condensate; РОУ – reduction and cooling unit

#### Анализ установок как объектов управления

Для анализа процесса пароснабжения как объекта управления необходимо определить векторы входных, выходных и возмущающих воздействий.

Рассмотрим установку, которая производит потребление пара высокого давления и выработку пара среднего давления, конденсата (установка тип «УВС») [8].

Данный объект имеет следующие входные величины: расход поступающего на установку пара высокого давления  $G_{\text{п}}^{\text{вых}}$ .

- снабжение без перебоев потребителей паром заданных параметров;
- максимальное и эффективное использование внутренних энергетических ресурсов, установление оптимального назначения их использования;
- выполнение баланса прихода и расхода энергоресурсов на любом отрезке времени при учете реальных графиков эксплуатации агрегатов с минимумом потерь энергоресурсов.

Упрощенная структурная схема пароснабжения представлена на рис. 2.

Выходными величинами для данного объекта выступают: расход генерируемого установкой пара среднего давления  $G_{\text{пс}}^{\text{вых}}$ ; расход генерируемого установкой конденсата  $G_{\text{к}}^{\text{вых}}$ .

Промежуточными величинами выступают: температура генерируемого установкой пара среднего давления  $T_{\text{пс}}^{\text{вых}}$ ; давление генерируемого установкой пара среднего давления  $P_{\text{пс}}^{\text{вых}}$ ; давление генерируемого установкой конденсата  $P_{\text{к}}^{\text{вых}}$ ; расход пара высокого давления безвозвратных потерь  $G_{\text{п}}^{\text{пп}}$ ; теплота собственного потребления  $Q_{\text{сн}}$ .

Для данного объекта возмущающими воздействиями являются: температура воздуха снаружи установки  $T_b$ ; температура поступающего на установку пара высокого давления  $T_n^{bx}$ ; давление подаваемого на установку пара высокого давления  $P_n^{bx}$ .

Схема установки в виде объекта управления приведена на рис. 3.

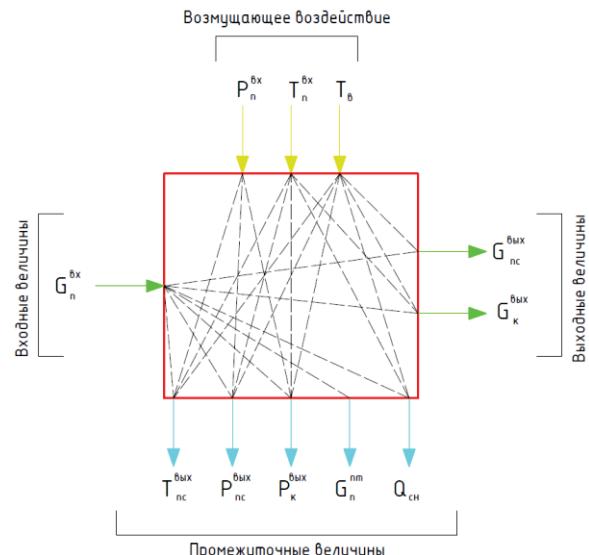


Рис. 3. Установка «УВС» в виде объекта управления

Fig. 3. Plant of the «УВС» type as a control object

Рассмотрим установку, которая производит потребление пара высокого давления и выработку конденсата (установка тип «УВК») [8, 9].

Данный объект имеет следующие входные величины: расход поступающего на установку пара высокого давления  $G_n^{bx}$ .

Выходными величинами для данного объекта выступают: расход генерируемого установкой конденсата  $G_k^{bx}$ .

Промежуточными величинами выступают: температура генерируемого установкой конденсата  $T_k^{bx}$ , давление генерируемого установкой конденсата  $P_k^{bx}$ , расход пара высокого давления безвозвратных потерь  $G_n^{nm}$ ; теплота собственного потребления  $Q_{ch}$ .

Для данного объекта возмущающими воздействиями являются: температура воздуха снаружи установки  $T_b$ ; температура поступающего на установку пара высокого давления  $T_n^{bx}$ ; давление подаваемого на установку пара высокого давления  $P_n^{bx}$ .

Схема установки в виде объекта управления приведена на рис. 4.

Рассмотрим установку, которая производит потребление пара среднего давления и выработку конденсата (установка тип «УС») [10].

Данный объект имеет следующие входные величины: расход поступающего на установку пара среднего давления  $G_{nc}^{bx}$ .

Выходными величинами для данного объекта выступают: расход генерируемого установкой конденсата  $G_k^{bx}$ .

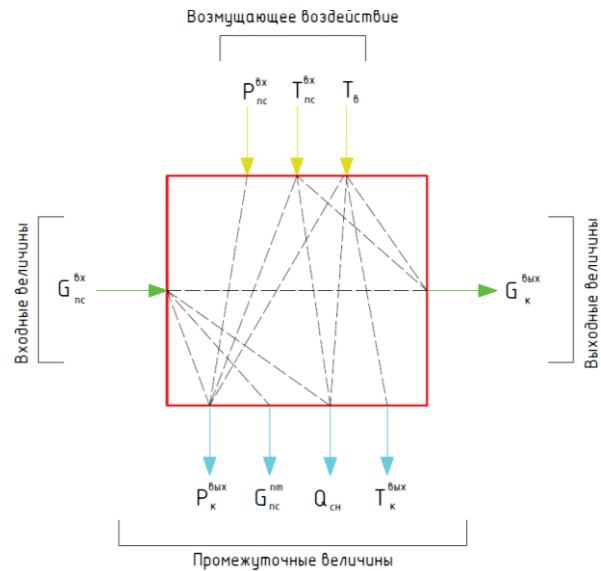


Рис. 4. Установка «УВК» в виде объекта управления

Fig. 4. Plant of the «УВК» type as a control object

Промежуточными величинами выступают: давление генерируемого установкой конденсата  $P_k^{bx}$ , расход пара среднего давления безвозвратных потерь  $G_n^{nm}$ ; теплота собственного потребления  $Q_{ch}$ .

Для данного объекта возмущающими воздействиями являются: температура воздуха снаружи установки  $T_b$ ; температура поступающего на установку пара среднего давления  $T_{nc}^{bx}$ ; давление подаваемого на установку пара среднего давления  $P_{nc}^{bx}$ .

Схема установки в виде объекта управления приведена на рис. 5.

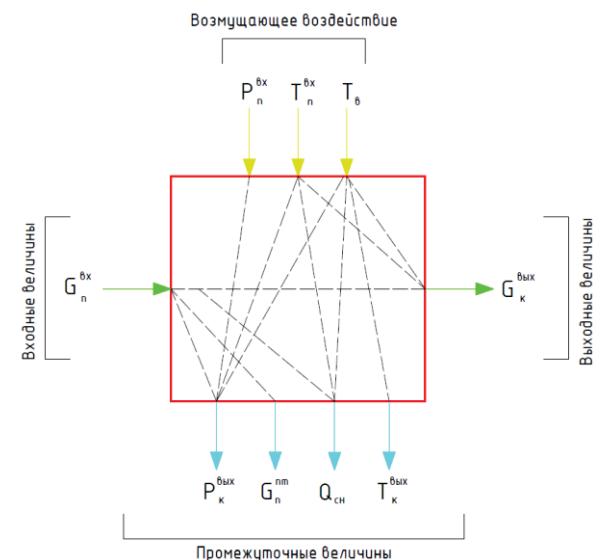


Рис. 5. Установка «УС» в виде объекта управления

Fig. 5. Plant of the «УС» type as a control object

Рассмотрим редукционно-охладительную установку, которая потребляет пар высокого давления, водопроводную воду и производит пар среднего давления [11].

Данный объект имеет следующие входные величины: расход поступающего на установку пара высокого давления  $G_{\text{п}}^{\text{вых}}$ , расход воды  $G_{\text{вод}}$ .

Выходными величинами для данного объекта выступают: расход генерируемого установкой пара среднего давления  $G_{\text{пс}}^{\text{вых}}$ , давление генерируемого установкой пара среднего давления  $P_{\text{пс}}^{\text{вых}}$ , температура генерируемого установкой пара среднего давления  $T_{\text{пс}}^{\text{вых}}$ .

Промежуточными величинами выступают: теплота собственного потребления  $Q_{\text{сн}}$ .

Для данного объекта возмущающими воздействиями являются: температура воздуха снаружи установки  $T_b$ ; температура поступающего на установку пара высокого давления  $T_{\text{п}}^{\text{вых}}$ ; давление подаваемого на установку пара высокого давления  $P_{\text{п}}^{\text{вых}}$ ; температура подаваемой воды  $T_{\text{вод}}$ .

Схема установки в виде объекта управления приведена на рис. 6.

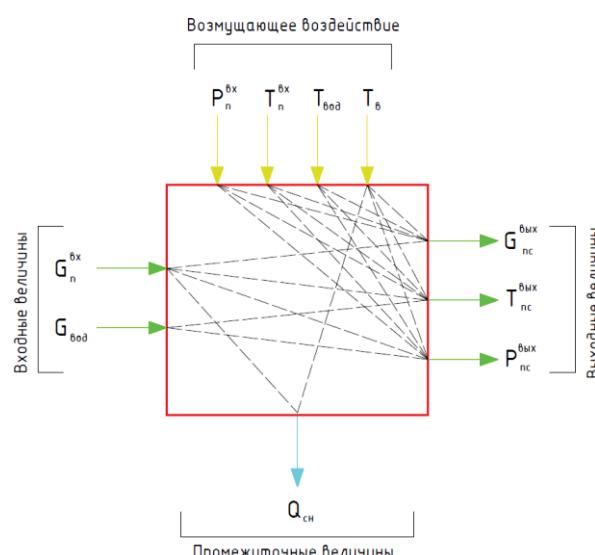


Рис. 6. Редукционно-охладительная установка в виде объекта управления

Fig. 6. Reduction and cooling unit as a control object

В результате анализа схемы парораспределения как объекта управления поставлена следующая задача.

Необходимо найти такое суммарное управляющее воздействие на систему установок, при котором производственная мощность нефтепереработки поддерживается на заданном уровне при условии сокращения использования внешних энергетических ресурсов и полного использования энергии, генерируемой внутри предприятия. Обязательным условием является необходимость поддержания заданного давления пара, подаваемого на установки.

#### Структура автоматизированной системы управления и основные технические решения программно-технического комплекса

В рамках реализации системы автоматизированного управления технологическим процессом пароснабжения предлагаются следующие подходы:

При падении давления в магистрали пара высокого давления (1) происходит наращивание объема пара, генерируемого котельными. При достижении максимального расхода пара внутренней выработки и недостаточном давлении в системе пара высокого давления происходит подпитка магистрали со стороны внешнего источника пара [12].

$$G_{\text{пвд}}(t) > \sum_{i=1}^N G_{\text{п}}^{\text{вых}}[i](t). \quad (1)$$

При падении давления в магистрали пара среднего давления (2) происходит увеличение производительности установок, генерирующих пар среднего давления при условии «запаса» по расходу пара высокого давления не менее 10 % [13].

$$G_{\text{псд}}(t) > \begin{cases} G_{\text{пс}}^{\text{вых}}[0.1](t) + \sum_{j=1}^M G_{\text{пс}}^{\text{вых}}[1.j](t) + \\ + \sum_{k=1}^P G_{\text{пс}}^{\text{вых}}[2.k](t) \end{cases}. \quad (2)$$

При падении давления в магистрали пара высокого давления при условии максимальной внутренней выработки пара высокого давления и максимальном расходе пара внешней выработки (3) предусмотрено отключение работающих установок в соответствии с таблицей приоритетов [13, 14].

$$G_{\text{пвд}}(t) > \sum_{i=1}^N G_{\text{п}}^{\text{вых}}(t) + [i]G_{\text{п}}^{\text{вых}}(\text{max}). \quad (3)$$

Управление клапанной системой пара высокого давления внешней генерации, редукционно-охладительными установками и внутренними котельными осуществляется по ПИ-закону регулирования.

Параллельно производится локальное управление параметрами пара, подаваемого на каждую из установок технологического процесса по ПИД-закону регулирования [15].

$G_{\text{пвд}}$  – суммарный (расчетный) расход пара высокого давления;  $G_{\text{псд}}$  – суммарный (расчетный) расход пара среднего давления;  $G_{\text{конд}}$  – суммарный (расчетный) расход конденсата, выработанного из пара среднего давления;  $G_{\text{пвд}}$  – суммарный (расчетный) расход конденсата, выработанного из пара высокого давления.

Предлагаемая структура системы управления представлена на рис. 7.

Для реализации данной системы на уровне локальных регуляторов поступающего на установки пара предлагается программно-технический комплекс на базе контроллеров, модулей ввода/вывода Siemens Logo, представляющий собой локальную систему автоматизированного управления.

В качестве основного контроллера предлагается использовать программно-технический комплекс на базе контроллеров и модулей ввода/вывода Siemens Simatic S7-1200.



Рис. 7. Функционально-структурная схема управления  
 Fig. 7. Functional-structural control scheme

Реализовать предложенный алгоритм предлагается на языках стандарта IEC 61131-3 в среде программирования Siemens [16].

Состав контрольно-измерительных приборов и аппаратов (КИПиА) системы:

- 1) преобразователи избыточного давления;
- 2) преобразователи температуры;
- 3) преобразователи расхода;
- 4) преобразователи дифференциального давления;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веревкин А.П., Муртазин Т.М., Насибуллин Ф.Г. Модернизация систем управления и обеспечения безопасности как инструмент повышения эффективности процессов переработки нефти и газа // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2019. – № 10. – С.12–17.
2. Sharma K.L.S. Overview of industrial process automation. – Amsterdam: Elsevier Science, 2011. – 320 р.
3. Управление инновационным развитием научноемкой производственной системы / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, О.В. Дмитриева, В.Р. Разиева, М.В. Сивова // Вопросы современной науки и практики. – 2016. – № 3 (61). – С. 146–152.
4. Фарунцев С.Д. Опыт применения методов математического моделирования для построения комплексных моделей управления объектами промысловой подготовки нефти // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 322. – № 12. – С. 7–21.
5. Redutskiy Yu. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry // Procedia. Computer Science. – 2017. – V. 109. – P. 745–753.
6. Джамбеков А.М., Дмитриевский Б.С. Моделирование автоматической системы регулирования температуры процесса стабилизации катализатора в условиях неопределенности // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 26–33.
7. Развитие перспективной автоматизации в нефтегазовой отрасли / Е.И. Громаков, Т.Е. Мамонова, А.В. Лиепиниш, А.В. Рымшин // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 10. – С. 98–102.
8. Математическое моделирование каталитических процессов переработки углеводородного сырья / А.В. Кравцов, Э.Д. Иванчина, Е.Н. Ивашикина, А.В. Костенко, Е.М. Юрьев, В.С. Бесков // Катализ в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 41–46.
9. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, О.Е. Митянина, Е.А. Кузьменко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
10. Грачев Ю.П., Тубольцев А.К., Тубольцев В.К. Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов. – М.: Изд-во «Легкая и пищевая промышленность», 1984. – 216 с.
11. Иванец К.Я., Лейбо А.Н. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация. – СПб.: Изд-во «Химия», 1966. – 343 с.
12. Задача управления процессом каталитического риформинга и метод ее решения / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, А.Г. Кокуев, А.М. Джамбеков // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 59–67.
13. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Изд-во «Наука», 2002. – 303 с.
14. Жоров Ю.М. Расчеты и исследования каталитических процессов нефтепереработки. – М.: Изд-во «Химия», 1973. – 216 с.
15. Mbilji J. Analog automation and digital feedback control techniques. – New York: Wiley-ISTE, 2018. – 256 p.
16. John K.-H., Tiegelkamp M. IEC 61131-3: programming industrial automation systems. Concepts and programming languages. – Luxembourg: Springer, 2010. – 240 p.

5) клапаны регулирующие седельные различного диаметра условного прохода.

Наиболее подходящие КИПиА, сертифицированные для использования на предприятиях добычи и переработки нефти, выпускает японское предприятие Yokogawa.

В качестве интерфейса и протокола информационного обмена между нижним и средним уровнем системы управления предлагается использовать RS-485 и Modbus RTU для минимизации рисков, связанных со значительными длинами кабельных линий.

Для осуществления промежуточного контроля параметров теплоносителя на протяженном паропроводе предлагается использование беспроводных промышленных преобразователей с системой ретрансляторов и базовой станцией, представляющих собой распределенную беспроводную ячеистую сеть [17, 18].

Применение беспроводных технологий, в частности IoT, позволит существенно увеличить наблюдаемость объекта управления и снизить затраты на реализацию предложенной системы управления [19, 20].

## Заключение

Таким образом, в данной работе рассмотрен технологический процесс пароснабжения как объект управления путем декомпозиции на отдельные установки, для каждой из которых был определен вектор входных, выходных, промежуточных и возмущающих величин. На основе полученных в ходе работы данных были сформулированы основные подходы к управлению технологическим процессом, предложена структура системы автоматизированного управления и основные элементы программно-технического комплекса.

8. Математическое моделирование каталитических процессов переработки углеводородного сырья / А.В. Кравцов, Э.Д. Иванчина, Е.Н. Ивашикина, А.В. Костенко, Е.М. Юрьев, В.С. Бесков // Катализ в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 41–46.
9. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, О.Е. Митянина, Е.А. Кузьменко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
10. Грачев Ю.П., Тубольцев А.К., Тубольцев В.К. Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов. – М.: Изд-во «Легкая и пищевая промышленность», 1984. – 216 с.
11. Иванец К.Я., Лейбо А.Н. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация. – СПб.: Изд-во «Химия», 1966. – 343 с.
12. Задача управления процессом каталитического риформинга и метод ее решения / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, А.Г. Кокуев, А.М. Джамбеков // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 59–67.
13. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Изд-во «Наука», 2002. – 303 с.
14. Жоров Ю.М. Расчеты и исследования каталитических процессов нефтепереработки. – М.: Изд-во «Химия», 1973. – 216 с.
15. Mbilji J. Analog automation and digital feedback control techniques. – New York: Wiley-ISTE, 2018. – 256 p.
16. John K.-H., Tiegelkamp M. IEC 61131-3: programming industrial automation systems. Concepts and programming languages. – Luxembourg: Springer, 2010. – 240 p.

17. Machine learning for wireless communications in the Internet of Things: a comprehensive survey / J. Jagannath, N. Polosky, A. Jagannath, F. Restuccia, T. Melodia // Ad Hoc Networks. – 2019. – V. 93. – P. 1–46.
18. Budampati R., Kolavennu S. Industrial wireless sensor networks: monitoring, control and automation. – Amsterdam: Elsevier Ltd, 2016. – 235 p.
19. Delsing J. IoT automation: arrowhead framework. – Boca Raton: CRC, 2017. – 400 p.
20. Imran M.A., Hussain S., Abbasi Q.H. Wireless automation as an enabler for the next industrial revolution. – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2020. – 288 p.

Поступила 15.05.2022 г.

#### Информация об авторах

**Матвеин В.Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных процессов и управления, Тамбовский Государственный технический университет.

**Краснянский М.Н.**, доктор технических наук, профессор, ректор, Тамбовский Государственный технический университет.

**Дмитриевский Б.С.**, доктор технических наук, профессор кафедры информационных процессов и управления, Тамбовский Государственный технический университет.

**Василевский К.С.**, аспирант кафедры информационных процессов и управления, Тамбовский Государственных технический университет.

UDC 681.5.017

## STEAM SUPPLY SYSTEM OF AN OIL REFINERY AS A CONTROL OBJECT

Valeriy G. Matveykin<sup>1</sup>,

ipu\_tstu@mail.ru

Mikhail N. Krasnyansky<sup>1</sup>,

tstu@tstu.ru

Boris S. Dmitrievsky<sup>1</sup>,

dmiboris@yandex.ru

Konstantin S. Vasilevskiy<sup>1</sup>,

kvasilevskii@yandex.ru

<sup>1</sup> Tambov State Technical University,  
106/5, corp. 2, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop and implement an automated control system for the steam supply process to implement optimal management of energy resources – medium and high-pressure steam. At the moment, the resource management system looks like a disparate local system of automated control with feedback that stabilizes the coolant parameters at the time of supply to the installation. Research in this direction will allow forming a centralized approach to managing the technological process of steam supply and improving the technical and economic indicators of oil refineries.

**The main aim** of the research is to develop an automated control system for the steam supply process that would reduce the use of steam from external generation and maximize the use of internal resources of the enterprise. It is proposed that the developed automated control system is aimed at improving the energy efficiency of steam-consuming industries.

**Object:** a steam supply system of an oil refinery, including consumers and generators of medium and high-pressure steam connected in series and in parallel with a pipeline system.

**The research methods** are based on a mathematical description of the installations involved in the technological process of steam supply, computational mathematics, and the theory of automatic control, as well as modern approaches to the control of the technological process.

**Results.** Decomposition of the technological process of steam supply into separate installations was carried out. Each element was considered as a control object, vectors of input, output, intermediate values and disturbing effects were determined. The main algorithm, structure of the control system and the main elements of the software and hardware complex are proposed.

### Key words:

Steam supply system, control system, steam condensate balance, control object, high pressure steam, medium pressure steam.

### REFERENCES

1. Verevkin A.P., Murtazin T.M., Nasibullin F.G. Advanced process control and safety systems as a tool for increased oil and gas processing efficiency. *Territory Neftegaz*, 2019, no. 10, pp. 12–17. In Rus.
2. Sharma K.L.S. *Overview of industrial process automation*. Amsterdam, Elsevier Science Publ., 2011. 320 p.
3. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Dmitrieva O.V., Razieva V.R., Sivova M.V. Management of innovative development of knowledge-based production system. *Issues of modern science and practice*, 2016, no. 3 (61), pp. 146–152. In Rus.
4. Farutsev S.D. Experience in application of mathematical modeling methods for elaboration of integrated control models of field treatment facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 7–21. In Rus.
5. Redutskiy Y. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry. *Procedia. Computer Science*, 2017, vol. 109, pp. 745–753.
6. Dzhambekov A.M., Dmitrievsky B.S. Simulation of an automatic temperature control system for the stabilization catalysate process in conditions of uncertainty. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 26–33. In Rus.
7. Gromakov E.I., Mamonova T.E., Liepinish A.V., Rimshin A.V. Development of advanced automation in the oil and gas industry. *Oil industry*, 2019, no. 10, pp. 98–102. In Rus.
8. Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Kostenko A.V., Yuriev E.M., Beskov V.S. Matematicheskoe modelirovaniye kataliticheskikh protsessov pererabotki uglevodorodnogo syrya [Mathematical modeling of catalytic processes of processing of hydrocarbon raw materials]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2008, no. 6, pp. 41–46.
9. Usheva N.V., Moizes O.E., Mityanina O.E., Kuzmenko E.A. *Matematicheskoe modelirovaniye khimiko-tehnologicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of chemical and technological processes]. Tomsk. Tomsk Polytechnic University Publ., 2014. 135 p.
10. Grachev Y.P., Tuboltsev A.K., Tuboltsev V.K. *Modelirovaniye i optimizatsiya teplo- i massoobmennnykh protsessov* [Modeling and optimization of heat and mass transfer processes]. Moscow, Light and food industry Publ., 1984. 216 p.
11. Ivanets K.Y., Leibo A.N. *Oborudovaniye neftepererabatyvayushchikh zavodov i ego ekspluatatsiya* [Equipment of oil refineries and its operation]. St Petersburg, Khimiya Publ., 1966. 343 p.
12. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Kokuev A.G., Dzhambekov A.M. Problem of control of catalytic reforming and method of its solutions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 59–67. In Rus.
13. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. *Robastnaya ustoychivost i upravleniye* [Robust stability and control]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 303 p.
14. Zhorov Yu.M. *Raschety i issledovaniya kataliticheskikh protsessov neftepererabotki* [Calculations and studies of catalytic processes of oil refining]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 216 p.
15. Mbihi J. *Analog automation and digital feedback control techniques*. New York, Wiley-ISTE, 2018. 256 p.
16. John K.-H., Tiegelkamp M. *IEC 61131-3: programming industrial automation systems. Concepts and programming languages*. Luxembourg, Springer Publ., 2010. 240 p.
17. Jagannath J., Polosky N., Jagannath A., Restuccia F., Melodia T. Machine learning for wireless communications in the Internet of

- Things: a comprehensive survey. *Ad Hoc Networks*, 2019, vol. 93, pp. 1–46.
18. Budampati R., Kolavennu S. *Industrial wireless sensor networks: monitoring, control and automation*. Amsterdam, Elsevier Ltd Publ., 2016. 235 p.
19. Delsing J. *IoT automation: arrowhead framework*. Boca Raton, CRC Publ., 2017. 400 p.
20. Imran M.A., Hussain S., Abbasi Q.H. *Wireless automation as an enabler for the next industrial revolution*. Hoboken, Wiley-IEEE Press Publ., 2020. 288 p.

*Received: 15 May 2022.*

#### Information about the authors

**Valeriy G. Matveykin**, Dr. Sc., professor, head of the department, Tambov State Technical University.

**Mikhail N. Krasnyansky**, Dr. Sc., professor, rector, Tambov State Technical University.

**Boris S. Dmitrievsky**, Dr. Sc., professor, Tambov State Technical University.

**Konstantin S. Vasilevskiy**, postgraduate student, Tambov State Technical University.

## ПОЛИМОДАЛЬНОСТЬ ГИСТОГРАММ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАК КРИТЕРИЙ ФЛЮИДОДИНАМИКИ

Мельник Игорь Анатольевич,  
melnik@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью выявления полимодальности в распределениях интенсивностей процессов различной природы. Причем причина полимодальности гистограмм несет в себе универсальный характер, а их моды могут служить поисковым критерием нефтегазовых залежей.

**Цель:** определение величин мод в полимодальных распределениях интенсивностей вторичных процессов, которые отражают динамический режим внешнего влияния и характер насыщения песчаного коллектора, а также являются «ярлыком» условий проявления полимодальности в распределениях величин раскрытиости трещин песчаной породы.

**Методы.** На основе ранее разработанной методологии и теории унификации статистической интенсивности процессов преобразования вещества в полимодальном распределении данных интенсивностей каждая мода соотносится с определенной динамикой воздействия внешнего потока. Согласно ранее разработанной кинематической теории преобразования систем сам процесс преобразования приобретает устойчивость, только когда вектор состояния процесса трансформации в векторном пространстве временных координат (время внутреннего преобразования элементов системы и время течения внешнего воздействия в пределах радиуса влияния на внутренние элементы) определяется угловыми константами, связанными с «золотой» пропорцией. Устойчивые состояния процессов являются причиной формирования полимодального статистического распределения.

**Результаты.** Исследования, проведенные на основе эмпирических данных, показали, что распределения выборок интенсивностей вторичных процессов в нефтегазонасыщенных песчаных породах всегда бимодальны. Меньшая величина моды бимодального распределения обусловлена закономерностью консервации углеводородами всех вторичных преобразований вещества. Центр тяжести моно-либо полимодального распределения интенсивностей в водонасыщенных пластах сдвинут в сторону большей величины. Интенсивность преобразования породы зависит от раскрытиости её трещин, а распределение выборки величин раскрытиости трещин также может быть полимодальным при условии приближительного равенства расстояния от скважин (место взятия образца керна) до тектонических разломов.

### Ключевые слова:

Интенсивность вторичных процессов, раскрытиость трещин, полимодальное распределение, углеводороды, «золотая» пропорция, геофизические исследования скважин, состояние процесса преобразования.

### Введение

В настоящей работе представлены результаты исследований статистических распределений выборок определенных геологических характеристик. Под геологическими характеристиками понимаются интенсивности вторичных геохимических процессов и раскрытиость трещин в песчаных коллекторах. Взаимосвязи данных параметров давно известны, но малоизучены. В свою очередь? причина возникновения полимодальности в статистических распределениях представленных параметров почти не изучалась, т. к. априори считается, что их форма распределения должна быть непрерывно нормальная либо логнормальная (т. е. мономодальная). Например, ряд авторов в качестве примеров приводят полученные биполимодальные гистограммы статистических распределений раскрытиости трещин, не объясняя реализованные формы, а заранее предполагая их мономодальность [1, 2].

В свою очередь, проведенные исследования форм распределения интенсивностей вторичных процессов преобразования песчаной породы показали, что данные распределения полимодальные [3, 4]. Полиминеральный песчаный коллектор в земной коре представляет собой открытую геологическую систему.

В результате литосферных тектонических процессов могут возникать глубинные разломы с оперяющими их трещинами, являющимися каналами флюидомиграции. При поступлении в коллектор гидротермальных флюидов в породе нарушается геохимическое равновесие и происходит образование вторичных аутигенных минералов из генетически связанных с ними аллотигенных компонентов породы [5]. В этом случае мы разделяем процесс воздействия внешнего фактора (глубинного флюида) и внутреннего процесса трансформации элементов системы. Каждый процесс характеризуется кинематическими параметрами – периодами времён течения и преобразования. Устойчивые состояния процессов преобразования обусловлены константами отношения этих периодов, которые связаны с «золотой» пропорцией [3].

Изучение причин полимодальности выявило, что каждая мода в статистическом распределении одного и того же процесса идентифицируется с определенной динамикой внешнего фактора воздействия. Например, исследования вероятностных графиков распределения зерен осадочной породы в системе река–озеро по размерам указывают на то, что большинство выборок являются полимодальными, с тремя модами, возникновение которых обусловлено изменением скорости водных потоков [6]. Также полимодаль-

ность распределения размеров зерен в черноземах Северо-Восточного Китая в большей степени контролируется ветровой эрозией почв и в меньшей степени процессами замерзания–испарения и антропогенным влиянием [7]. Согласно результатам статьи [8], бимодальное распределение размеров песчинок на острове Фишер определяется фациальными условиями.

В статье [9] проведенные экспериментальные исследования динамических характеристик процесса грануляции микрокристаллической целлюлозы и моногидрата  $\alpha$ -лактозы показали, что степень грануляции и размеры гранул сильно зависят от отношения скорости подачи порошка (сырья) к скорости крутящего момента шнека. Увеличение мод в распределении размеров гранул происходит при уменьшении скорости подачи порошка.

Полимодальное распределение состояний, свойств (например, размеров, форм, плотностей зарядов и т. д.) биомакромолекул, гидрогелей зависит от влияния внешних полей [10]. В свою очередь, рассматриваемое распределение размеров частиц обусловлено созреванием многокомпонентных дисперсных систем с испарениями (фазовыми превращениями) внутри частиц [11]. Если внешнее давление сопоставимо (или несколько выше) с внутренним давлением насыщенного пара, то для малорастворимых нелетучих веществ образуются сложные статистические распределения.

Вне зависимости от природы открытых систем при исследовании их составных элементов распределение количества преобразованных элементов (за счет внешних факторов) всегда полимодально. Преобразование геологической системы трансформирует все сопутствующие элементы, будь то минералы, поры, трещины, флюиды и т. д. Если полимодальное распределение интенсивности вторично преобразованных элементов породы коллектора зависит от раскрытия трещин, то и распределение величин раскрытия (подводящих путей внешнего фактора влияния) также может быть полимодально.

Целью данной работы является подтверждение следующих гипотез:

- величины мод в полимодальных распределениях интенсивностей вторичных процессов могут отражать динамический режим внешнего влияния и характер насыщения песчаного коллектора (в нефтегазоносных месторождениях);
- существуют условия проявления полимодальности в распределениях величин раскрытия трещин песчаной породы.

### Методы исследования

Интенсивность процесса преобразования элементов открытой системы соответствует следующей зависимости [3, 4]:

$$I = Q \frac{\Delta\tau}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $Q$  [см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>] – произведение плотности потока (флюида) внешних элементов влияния, проникающих в сферу радиуса взаимодействия, содержания потен-

циально преобразующихся внутренних компонентов в единице объема и вероятности взаимодействия (при исследовании выборки данных вместо  $Q$  можно рассматривать относительную величину  $Q' = Q/\langle Q \rangle$ , где  $\langle Q \rangle$  – среднее значение выборочных данных  $Q$ );  $\Delta\tau$  – период времени внутреннего преобразования количественных характеристик элементов системы;  $\Delta t$  – период времени течения (пролета) внешнего фактора воздействия (флюида) в пределах радиуса влияния на внутренние элементы.

Если период времени пролета внешних элементов влияния окажется меньше периода времени преобразования внутренних элементов, то вероятность трансформации элементов системы близится к нулю. В свою очередь, когда в течение периода времени движения внешних элементов образуется составная подсистема с внутренними трансформирующими элементами (с возможным дальнейшим процессом релаксации преобразования), вероятность процесса трансформации самой системы стремится к единице. Это условие назовем *первым условием преобразования*:

$$\Delta\tau \leq \Delta t.$$

В случае относительного единства внутренних элементов, их равномерной плотности в системе и постоянства потока внешнего источника  $Q = \text{const}$  изменение интенсивности процессов будет полностью обусловлено изменением величин временных параметров (1).

Согласно ранее разработанной кинематической теории преобразования системы сам процесс преобразования приобретает *устойчивость*, только когда вектор состояния процесса трансформации в векторном пространстве временных координат  $(\tau; t)$  определяется угловыми константами, связанными с «золотой» пропорцией («золотая» пропорция – отношение большего к меньшему пропорционально отношению целого к большему, равного 1, 618... [12], «проявляет себя» в качестве «стандартизатора-гармонизатора» эволюции естественных процессов) [3].

На основе вычисленных базовых состояний процессов: пропорционально-стабильного (ПС); пропорционально-мобильного (ПМ); непропорционально-стабильного (НС), определены семь устойчивых состояний процессов преобразования открытых систем, обуславливающих полимодальность в статистических распределениях интенсивностей процессов преобразования (табл. 1). Причем данные состояния могут быть одномерными (выделяются звездочкой), т. е. с одним (нормальным, доминирующим) внешним фактором воздействия, и двумерными – с присутствием еще и альтернативного источника влияния. ПС-состояние характеризуется начальным равновесным состоянием, а также равновесными состояниями в нормальном ( $x$ ) и альтернативном ( $y$ ) внешних потоках.

В табл. 1 показаны вычисленные константы мод для распределения унифицированной выборки. Унифицированные математические ожидания мод определяются согласно уравнению [4, 13]:

$$\mu_{\text{mod}} = \exp \left[ \frac{G_{\text{mod}} - C}{\chi} \right] - 1, \quad (2)$$

где  $G_{\text{mod}} = \frac{n_0}{\langle n \rangle} \cdot \frac{I_0}{\langle I \rangle}$ , т. е. относительная величина любых измеряемых выборочных значений, соответствующих  $n_0$  – количеству преобразованных элементов,  $I_0$  – интенсивностям процессов преобразования элементов, измеряемых характеристик элементов системы на уровне мод;  $\langle n \rangle$  и  $\langle I \rangle$  – средние значения выборок преобразованных элементов и интенсивностей

процессов преобразования; константы равны  $C = -3,5$  и  $\chi$ , находящейся в пределах 12–14. Для каждой генеральной выборки систем различной природы преобразования среди в гистограмме распределения измеряемого значения  $n$ , постоянная  $\chi$  в уравнении (2) определяется в случае соответствия математического ожидания моды  $\mu_{\text{PC}} = 0,3819$  минимальной (первой либо, в редком случае, второй) моде. Формула вычисления константы  $\chi$  выглядит так:

$$\chi = \frac{G_{\text{mod}}(1) + 3,5}{0,3235}. \quad (3)$$

**Таблица 1.** Математические ожидания мод унифицированных дискретных состояний статистических распределений интенсивностей процессов преобразования систем

**Table 1.** Mathematical expectations of modes of unified discrete states of statistical distributions of intensities of system transformation

№	Состояния States	Угол, рад Angle, rad	Мода, усл. ед. Mode, arb. unit	Описание принципа состояния процесса Description of the process state principle
1	ПС	1	0,382	Начальное равновесное состояние процесса Initial equilibrium state of the process
2	ПМ*	0,973	0,392	Уменьшение времени воздействия внешнего нормального (доминирующего) фактора либо увеличение времени преобразования внутренней системы относительно равновесного состояния процесса Reducing the time of influence of the external normal (dominating) factor or increasing the time of transformation of the internal system relative to the equilibrium state of the process
3	ПМ	0,947	0,403	Уменьшение времени течения внешнего фактора либо увеличение времени преобразования внутренней системы под действием нормального и альтернативных источников влияния относительно равновесного состояния процесса Reducing the flow time of an external factor or increasing the transformation time of the internal system under the influence of normal and alternative sources of influence relative to the equilibrium state of the process
4	НС*	0,912	0,418	Уменьшение времени воздействия внешнего доминирующего фактора и пропорциональное увеличение времени преобразования внутренней системы относительно равновесного состояния процесса Reducing the time of influence of the external dominant factor and a proportional increase in the transformation time of the internal system relative to the equilibrium state of the process
5	НС	0,887	0,43	Уменьшение времени воздействия внешнего фактора и пропорциональное увеличение времени преобразования внутренней системы включительно под действием нормального и альтернативного источников влияния относительно равновесного состояния процесса Reducing the time of influence of an external factor and proportional increase of time of transformation of the internal system inclusive under the action of normal and alternative sources of influence relative to the equilibrium state of the process
6	ПС(2)у	0,831	0,459	Равновесное состояние процесса в альтернативном внешнем потоке относительно начального равновесного состояния процесса Equilibrium state of the process in the alternative external flow relative to the initial equilibrium state of the process
7	ПС(2)х	0,757	0,504	Равновесное состояние процесса в нормальном внешнем потоке относительно начального равновесного состояния процесса Equilibrium state of the process in the normal external flow relative to the initial equilibrium state of the process

При исследовании интенсивностей вторичных преобразований песчаных пластов в разрезах скважин, определив интенсивности в 10–30 пластах по глубине и в десятках скважинах на изучаемой площади, можно построить два типа гистограмм в зависимости от латеральной либо вертикальной миграции флюидов. Для этого, усредняя данные интенсивности исследуемого горизонта по скважине, мы получаем выборку (по количеству скважин) закономерности латерального распределения флюида и, наоборот, усредняя по скважинам данные интенсивностей пластов всего разреза, мы получаем закономерности вертикального распределе-

ния. В этом случае источником и причиной миграции флюидов являются глубинные вертикальные каналы фильтрации, а латеральное течение по сути вторично. Поэтому «вертикальное» распределение будет отражать доминирующий нормальный поток, а «латеральная» гистограмма – альтернативный внешний фактор. В первом случае в распределении интенсивностей появляется мода № 7 (табл. 1), а во втором случае – мода № 6, относительно которых определяются последующие моды данных гистограмм.

В работах [4, 13] приводятся теоретические и эмпирические доказательства того, что интенсивность

вторичных преобразований эквивалентна  $P(A; B)$  – двухмерной вероятности данных преобразований:

$$I \sim i \sim P(A; B) \sim |R|,$$

где  $i$  – статистическая интенсивность вторичных геохимических преобразований;  $R$  – коэффициент корреляции  $A$  и  $B$  – измеряемых (вычисляемых) параметров геофизических исследований скважин (ГИС). Подтверждена валидность статистически-корреляционного метода интерпретации (СКИ) материалов ГИС, на основании которого статистическая интенсивность определяется по формуле:

$$i = YR^2, \quad (4)$$

$$Y = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_h^j,$$

где  $p$  – количество всех выборочных значений при  $R_h > |\pm 0,6|$ ;  $K$  – количество выборочных значений всего исследуемого интервала;  $H$  – количество «внутри интервальных» выборочных значений;  $J$  – количество «внутри интервалов», причем  $J < H \leq K$ , а если  $H = K$ , то  $J = 1$ . Статистический параметр  $Y$  выражает интервальную меру влияния вторичных процессов, т. е. в данном случае показывает долю преобразованного вещества исследуемого пласта.

Мигрирующие в литосфере флюиды могут оставлять значительный геохимический «след наложенного эпигенеза» в коллекторах фундамента и осадочного чехла [5, 14]. В этом случае для каждого пласта исследуемой территории фоном служат все процессы диагенеза и катагенеза, приводящие к однородному влиянию на содержание минералов. Данный «след» является доминантным относительно других фоновых процессов в песчаных отложениях, и его можно зафиксировать при следующих корреляционных связях (4):

- отрицательная регрессия содержания железа с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) породы – *пириты либо хлоритизированные биотиты*;
- положительная регрессия глинистости с пористостью породы – *вторичные каолиниты*;
- отрицательная регрессия содержания калия с УЭС породы – *вторичные пелиты*.

Вычисление статистической интенсивности вторичных геохимических преобразований по материалам ГИС на основе репрезентативного количества данных позволяет исследовать формы гистограмм распределения интенсивностей вторичных преобразований по всему разрезу скважин.

В источниках [4, 13] рассмотрены геохимические условия и обоснована валидность перечисленных корреляционных зависимостей. Причем относительные содержания железа и калия в песчаной породе определяются по разработанной методике, на основе материалов нейтронного каротажа и гамма-каротажа скважины [4].

### Результаты исследования

В монографии Б.А. Лебедева [15; рис. 38, 40] показаны гистограммы числа контактов (ЧК) на зерно

«терригенного девона» для водоносных и нефтенасыщенных песчаников. Число контактов пропорционально интенсивности вторичного геохимического процесса. Гистограмма ЧК нефтенасыщенного песчаника бимодальна, причем её центр тяжести сдвинут в меньшую сторону относительно мономодальной гистограммы ЧК водоносной породы. Данное свойство «нефтеносной» гистограммы обусловлено закономерностью Чепикова, основанной на свойстве углеводородов консервировать процессы вторичных преобразований.

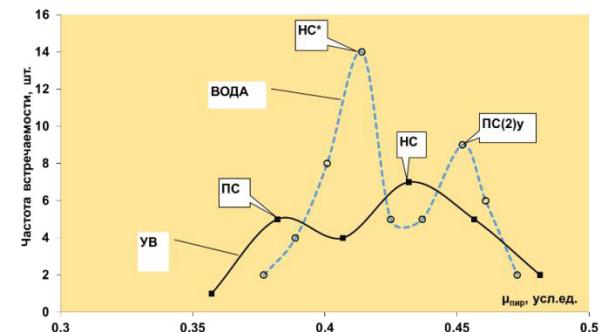


Рис. 1. Гистограммы унифицированных математических ожиданий мод интенсивностей пиритизации для нефтегазоносных и водоносных песчаных интервалов Томской области

Fig. 1. Histograms of unified mathematical expectations of pyritization intensity modes for oil and gas and water-bearing sandy intervals of the Tomsk region

Закономерность Чепикова проявилась при построении гистограмм выборочных данных интенсивностей вторичных процессов пиритизации и пелитизации. Например, на нефтегазовых месторождениях Томской области были изучены 59 водоносных и 19 нефтеносных песчаных пластов мезозоя. На основании формул (2)–(4) вычислены статистические интенсивности и математические ожидания мод вторичной пиритизации. Полученные гистограммы математических ожиданий мод пиритизации выявили следующие закономерности (рис. 1): бимодальность пиритизации водоносных и нефтеносных пластов различная; для нефтеносных интервалов моды пиритизации сдвинуты влево (относительно «водоносных» мод), они относятся к начальному равновесному состоянию (быстрой «консервации» – ПС) и состоянию интенсивной пиритизации в результате поступления в коллектор глубинной УВ-смеси флюидов с латеральной миграцией и дальнейшим её фазовым разделением (НС); для водоносных интервалов низшая мода (НС\*) относится к состоянию интенсивного вторичного образования пиритов в результате поступления флюидов только по вертикальным глубинным разломам, а состояние (ПС(2)у) обусловлено интенсивным образованием вторичных пиритов в результате латерального течения флюида с последующей «консервацией», т. е. формированием химически равновесной среды.

На Северо-Тамбейском газоконденсатном месторождении полуострова Ямал при исследовании распределения интенсивностей вторичной пелитизации в

песчаных пластах меловых отложений были изучены 28 водоносных и 60 УВ-насыщенных интервалов. Получены две гистограммы: бимодальная – для УВ насыщенных пластов; мономодальная – для водоносных интервалов (рис. 2). Здесь также видно, что присутствие ПС-состояния для УВ-насыщенных пластов можно объяснить закономерностью Чепикова, а одинаковые моды НС-состояний водоносных и газоконденсатных интервалов указывают на единобразный процесс вторичной пелитизации в этом режиме. Полученная бимодальная гистограмма интенсивности пиритизации УВ-насыщенных песчаников на Северо-Тамбейском месторождении подтверждает процесс консервации вторичного минералообразования (рис. 3).

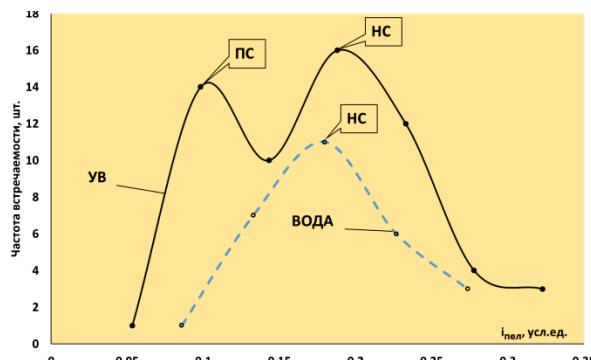


Рис. 2. Гистограммы интенсивностей вторичной пелитизации для УВ-насыщенных и водонасыщенных песчаных интервалов Северо-Тамбейского газоконденсатного месторождения

Fig. 2. Histograms of secondary pelitization intensities for hydrocarbon-saturated and water-saturated sandy intervals of the North Tambey gas condensate field

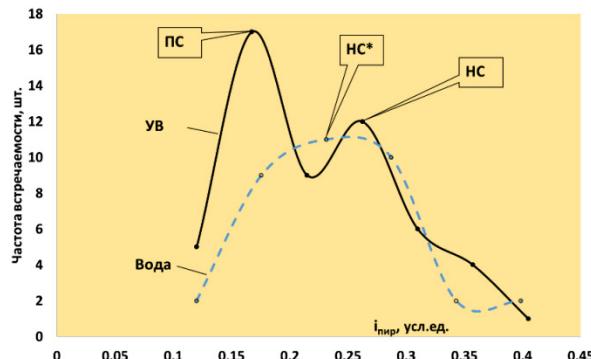


Рис. 3. Гистограммы интенсивностей вторичной пиритизации для УВ-насыщенных и водонасыщенных песчаных интервалов Северо-Тамбейского газоконденсатного месторождения

Fig. 3. Histograms of secondary pyritization intensities for hydrocarbon-saturated and water-saturated sandy intervals of the North Tambey gas condensate field

Интенсивность усреднённого (по разрезу скважины) вторичного минералообразования зависит от расстояния до разлома и раскрытия трещин согласно следующей зависимости [4, 13]:

$$\langle i \rangle_z = A \eta_z \exp(-Br\eta_z^2),$$

где  $r$  – расстояние от скважины до разлома [м];  $B$  – константа песчаных интервалов для исследуемого горизонта (мелового, юрского) относительно территориального флюидоупора [ $\text{м}^3$ ];  $A=6 \times 10^{-3}$  – унифицированная постоянная, приводящая в соответствие правую часть уравнения и статистическую интенсивность, одинаковая для всех горизонтов и территорий [ $1/\text{м}^2$ ]; эмпирические универсальные константы интенсивностей вторичной каолинитизации:  $\eta_1=41,2$  [ $\text{м}^2 \cdot \text{д. ед.}$ ],  $\eta_2=28,6$  [ $\text{м}^2 \cdot \text{д. ед.}$ ],  $\eta_3=21,74$  [ $\text{м}^2 \cdot \text{д. ед.}$ ],  $\eta_4=16,13$  [ $\text{м}^2 \cdot \text{д. ед.}$ ]. Универсальные константы для определенного геохимического процесса зависят от квадрата раскрытия трещин:

$$\eta = \frac{\delta^2 (C^m - C_0^m)}{m},$$

где  $\delta$  – раскрытие трещин, [м];  $m=1-\gamma$ ,  $\gamma$  – показатель гетерогенной реакции ( $\gamma \neq 1$ ),  $C$  и  $C_0$  – концентрации флюида до и после вступления в реакцию. Объемная константа  $B$  в большей степени зависит (обратно пропорционально) от градиента давления глубинного флюида и пропорциональна коэффициенту трещиноватости.

Для определения универсальных констант по каждой скважине исследуемого горизонта усреднялись параметры статистической интенсивности каолинитизации. Априори предполагалось, что химизм процесса каолинитизации всего разреза единобразен, т. е.  $C, m = \text{const}$ . Расстояния от скважины до ближайшего разлома брались на основании сейсмических карт по тектоническим нарушениям баженовской свиты (для меловых отложений) и фундамента (для юрских пластов) исследуемых площадей. Были получены четыре регрессии, и при  $r \rightarrow 0$  определялись константы  $\eta_z$ , моды и состояния (табл. 2).

Таблица 2. Полимодальность раскрытия трещин по результатам определения интенсивности вторичной каолинитизации

Table 2. Polymodality of crack opening based on the results of determining the intensity of secondary kaolinitization

$\eta_z, \text{м}^2 \cdot \text{д. ед.}$ Universal constants	$\delta, \text{мкм}$ Openness	$\mu_{\text{mod}}, \text{ усл.ед.}$ Mode, arb. unit	Состояния States
16,1	10,0	0,382	ПС
21,7	11,65	0,407	ПМ
28,6	13,37	0,438	НС
41,2	16,0	0,499	ПС(2)х

В табл. 2 раскрытия трещин вычислялись на основании двух допущений: во-первых, показатель гетерогенной реакции и концентрации флюида до и после вступления в реакцию постоянны, во-вторых, средняя минимальная величина раскрытия трещин песчаных пород соответствует 10 мкм. На основании табличных данных исследований 1110 образцов каменного материала [1. С. 69] построена гистограмма распределения раскрытия трещин в песчаных породах (рис. 4). Наибольшее число измерений (430 изм.) было получено по результатам минимальной раскрытии. На рис. 4 проявились 3 моды раскрытия трещин: 10, 100 и 300 мкм. Но если посмотреть её

статистическое распределение в пределах  $\sim 5\text{--}20$  мкм, то, вполне возможно, мы обнаружим 4 моды высшей модальности. К тому же необходимо соблюсти ещё одно условие – расстояния от скважин (в которой брался керн) до разломов приблизительно должны быть одинаковы. Это связано с тем, что раскрытие трещин сильно зависит от порового давления и тензора эффективных напряжений, величины которых также контролируются расстоянием до разрыва литосферы.

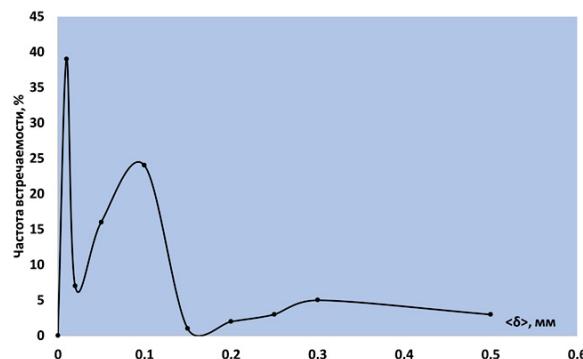


Рис. 4. Гистограмма усредненной раскрытии трещин песчаной породы по [1]

Fig. 4. Histogram of averaged crack opening in sandy rock according to [1]

Согласно модели раскрытии трещин Бартона–Бандиса раскрытие бывает механическая и гидравлическая [16–19]. Данные характеристики обусловлены напряженно-деформированным состоянием, шероховатостью стенок трещин и прочностью породы. Причем при тектонических процессах литосферы трещины в породе распространяются с очень высокой скоростью – порядка 0,4–0,5 величины скорости звука в материале. Процесс распространения трещины является дискретным в зависимости от вязкости материала. В наиболее вязкой среде наступает период «спокойствия», когда рост трещины приостанавливается. Поэтому скорость распространения трещин в разнообразных породах литосферы различна, и время образования раскрытии также различается [20], соответственно, полимодальность статистического рас-

пределения раскрытии трещин в коллекторах должна подчиняться закономерностям уравнений (2), (3).

### Заключение

В результате применения предлагаемого метода статистико-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин при изучении вторичных процессов в песчаных породах были выявлены следующие закономерности:

1. Формы и центры тяжести статистических гистограмм интенсивностей вторичных процессов (в песчаной породе) для водоносных и углеводородных насыщенных интервалов отличаются друг от друга.
2. Для углеводородов насыщенных интервалов гистограммы интенсивностей вторичных процессов всегда бимодальны (в отличие от водоносных), причем частота встречаемости первой (меньшей) моды нефтегазонасыщенных интервалов намного превышает частоту встречаемости данной интенсивности водоносных пластов. Минимальная мода соответствует состоянию пропорционально-стабильного процесса, где при УВ-насыщении интервала объясняется «замораживанием» всех процессов преобразования (закономерность Чепикова).
3. Появление полимодальности в гистограммах раскрытии трещин возможно в случае соблюдения следующего условия – при изучении образцов керна, расстояния от скважин до тектонических разломов должны быть приблизительно одинаковыми.

Таким образом, определение унифицированных математических ожиданий мод в выборке полимодальных распределений интенсивностей вторичных процессов и раскрытии трещин полностью соответствует ранее вычисленным величинам-константам, обусловленным постоянной «золотой» пропорции. «Привязав» выборочные данные интенсивности процесса либо раскрытии трещин к определенной моде, можно выявить состояние процесса преобразования среды и динамический режим трансформации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
2. Подходы к моделированию карбонатного трещиноватого коллектора на примере месторождения Восточной Сибири / А.А. Козяев, Е.И. Смоленцев, А.Н. Бибик, К.Е. Закревский // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2016. – Вып. 42. – № 1. – С. 11–15.
3. Мельник И.А. Соотношение временных параметров геохимического процесса наложенного эпигенеза и «золотое сечение» // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 5. – С. 30–39.
4. Мельник И.А. Определение интенсивности геохимических процессов по материалам геофизических исследований скважин. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2016. – 146 с.
5. Мельник И.А., Харламов С.Н. К вопросу гидродинамического моделирования процессов восходящей миграции реологически сложных неоднородных флюидов из глубинных подзем-
- ных коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 24–37.
6. Ashley G.M. Interpretation of polymodal sediments // The Journal of Geology. – 1978. – V. 86. – № 4 – P. 411–421. URL: <https://doi.org/10.1086/649710> (дата обращения 24.05.2022).
7. Distributions of particle sizes in black soil and their environmental significance in northeast China / Binghe Yan, Yulan Zhang, Shuying Zang, Qiang Chen, Li Sun // Sustainability. – 2021. – V. 13. – 3706. URL: <https://doi.org/10.3390/su13073706> (дата обращения 24.05.2022).
8. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments of Fisher Island and Brookes Peninsula, East Antarctica / Rajesh Asthana, Prakash Kumar Shrivastava, Hari Bahadur Srivastava, Mirza Javed Beg, Pradeep Kumar // Advances in Polar Science. – 2013. – V. 4 (24). – P. 281–295. URL: [https://www.researchgate.net/publication/276077395\\_Hydrochemistry\\_and\\_sediment\\_characteristics\\_of\\_polar\\_periglacial\\_lacustrine\\_environments\\_on\\_Fisher\\_Island\\_and\\_Brookes\\_Peninsula\\_East\\_Antarctica](https://www.researchgate.net/publication/276077395_Hydrochemistry_and_sediment_characteristics_of_polar_periglacial_lacustrine_environments_on_Fisher_Island_and_Brookes_Peninsula_East_Antarctica) (дата обращения 07.09.2022).

9. Torrecillas C.M., Halberta W.G., Lamprou D.A. A novel methodology to study polymodal particle size distributions produced during continuous wet granulation // International Journal of Pharmaceutics. – 2017. – V. 519. – P. 230–239. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517317300248?via%3Dihub> (дата обращения 24.05.2022).
10. Lin Y-C., Rotenberg B., Dzubiella J. Structure and position-dependent properties of inhomogeneous suspensions of responsive colloids. DOI: 10.1103/PhysRevE.102.042602 URL: <https://arxiv.org/abs/2009.07511> (дата обращения 24.05.2022).
11. Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of bi- and polymodal distributions and the Nonnostwald behavior of disperse system // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – V. 92. – № 5. – P. 1191–1200.
12. Stakhov A.P. The «golden» number theory and new properties of natural numbers // British Journal of Mathematics & Computer Science. – 2015. – V. 11 (6). Article no. BJMCS.21385. URL: <http://www.sciedomain.org/> (дата обращения 24.05.2022).
13. Мельник И.А. Основы статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин. – М.: РУСАЙНС, 2022. – 76 с.
14. Никитин И.А. Факторы, влияющие и определяющие характер насыщения низкоомных коллекторов на примере месторождения Сургутского свода // East European Scientific Journal. – 2021. – Т. 12 (76). – С. 43–52.
15. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
16. Жигульский С.В., Тихоцкий С.А. Оценка раскрытии системы трещин в условиях изменения коэффициента шероховатости трещины на основе данных о напряженно-деформированном состоянии // Специализированный журнал «Бурение и нефть». – 2020. – № 7–8. URL: <https://burneft.ru/archive/issues/2020-07/30> (дата обращения 24.05.2022).
17. Byerlee J. Friction of rocks // Pure and Applied Geophysics PAGEOPH – 1978. – V. 116. – P. 615–626. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00876528.pdf> (дата обращения 07.09.2022).
18. Barton N. R. Modelling rock joint behavior from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design. – 1982. – 118 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/236433630\\_Modelling\\_rock\\_joint\\_behavior\\_from\\_in\\_situ\\_block\\_tests\\_Implications\\_for\\_nuclear\\_waste\\_repository\\_design](https://www.researchgate.net/publication/236433630_Modelling_rock_joint_behavior_from_in_situ_block_tests_Implications_for_nuclear_waste_repository_design) (дата обращения 24.05.2022).
19. Barton C.A., Zoback M.D., Moos D. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock // Geology. Geological Society of America. – 1995. – № 23–8. – P. 683–686.
20. Sheng Zhang, Yang Qiao, Hong-Bao Zhao. The crack opening displacement of rock fracture process zone. – 2019. DOI: 10.2298/TSCI180913214Z URL: [https://www.researchgate.net/publication/333278411\\_The\\_crack\\_opening\\_displacement\\_of\\_rock\\_fracture\\_process\\_zone](https://www.researchgate.net/publication/333278411_The_crack_opening_displacement_of_rock_fracture_process_zone) (дата обращения 24.05.2022).

Поступила 26.05.2022 г.

#### Информация об авторах

**Мельник И.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 53.081; 550.83+552.5+553.98

## POLYMODALITY OF HISTOGRAMS OF GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AS A CRITERION OF FLUID DYNAMICS

Igor A. Melnik,  
melnik@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the necessity to identify the polymodality in distributions of the intensities of processes of various nature. Moreover, the reason for the polymodality of histograms is universal, and their modes can serve as a search criterion for oil and gas deposits.

**Purpose:** to determine the values of modes in the polymodal distributions of the intensities of secondary processes, which reflect the dynamic regime of external influence and the nature of sandy reservoir saturation, as well as to identify the conditions for polymodality manifestation in distributions of the values of the cracks in sandy rock.

**Methods.** Based on the previously developed methodology and the theory of unification of the statistical intensity of the matter transformation in the polymodal distribution of these intensities, each mode corresponds to a certain dynamics of the external flow. According to the previously developed kinematic theory of system transformation, the transformation itself acquires stability only when the state vector of transformation in the vector space of time coordinates (the time of internal transformation of the elements of the system and the time of the external influence within the radius of influence on the internal elements) is determined by the angular constants associated with «golden» proportion. Steady states of processes are the reason for the formation of a polymodal statistical distribution.

**Results.** The studies conducted based on empirical data, have shown that the distributions of samples of the intensities of secondary processes in oil and gas saturated sandy rocks are always bimodal. The smaller value of the bimodal distribution mode is caused by the conservation pattern of all secondary transformations of matter by hydrocarbons. The center of gravity of a mono- or polymodal distribution of intensities in water-saturated reservoirs is shifted towards a larger value. The intensity of rock transformation depends on its fracture opening, and the distribution of the sample of fracture opening values can also be polymodal, provided that the distance from the wells (the place where the core sample was taken) to tectonic faults is approximately equal.

### Key words:

Intensity of secondary processes, fracture opening, polymodal distribution, hydrocarbons, «golden» proportion, well logging, conversion state.

### REFERENCES

1. Golf-Rakht T.D. *Osnovy neftepromyslovoj geologii i razrabotki treshchinovatyh kollektorov* [Fundamentals of oilfield geology and the development of fractured reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 608 p.
2. Kozyaev A.A., Smolentsev E.I., Bibik A.N., Zakrevskiy K.E. Approaches to modeling a carbonate fractured reservoir on the example of a field in Eastern Siberia. *Scientific and technical bulletin of Rosneft Oil Company OJSC*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 11–15. In Rus.
3. Melnik I.A. The ratio of time parameters of the geochemical process of superimposed epigenesis and the «golden section». *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2015, no. 5, pp. 30–39. In Rus.
4. Melnik I.A. *Opredelenie intensivnosti geokhimicheskikh protsessov po materialam geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Determination of the intensity of geochemical processes based on the materials of geophysical studies of wells]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2016. 146 p.
5. Melnik I.A., Kharlamov S.N. On the issue of hydrodynamic modeling of the processes of ascending migration of rheologically complex heterogeneous fluids from deep underground reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 24–37. In Rus.
6. Ashley G.M. Interpretation of polymodal sediments. *The Journal of Geology*, 1978, vol. 86, no. 4, pp. 411–421. Available at: <https://doi.org/10.1086/649710> (accessed 24 May 2022).
7. Binghe Yan, Yulan Zhang, Shuying Zang, Qiang Chen, Li Sun. Distributions of particle sizes in black soil and their environmental significance in northeast China. *Sustainability*, 2021, vol. 13, 3706. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13073706> (accessed 24 May 2022).
8. Rajesh Asthana, Prakash Kumar Srivastava, Hari Bahadur Srivastava, Mirza Javed Beg, Pradeep Kumar. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Brookes Peninsula, East Antarctica. *Advances in Polar Science*, 2013, vol. 4 (24), pp. 281–295. Available at: (PDF) Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Brookes Peninsula, East Antarctica (researchgate.net) (accessed 24 May 2022).
9. Torrecillas C.M., Halberstadt G.W., Lamprou D.A. A novel methodology to study polymodal particle size distributions produced during continuous wet granulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 2017, vol. 519, pp. 230–239. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517317300248?via%3Dihub> (accessed 24 May 2022).
10. Lin Y-C, Rotenberg B., Dzubiella J. Structure and position-dependent properties of inhomogeneous suspensions of responsive colloids. DOI: 10.1103/PhysRevE.102.042602 Available at: <https://arxiv.org/abs/2009.07511> (accessed 24 May 2022).
11. Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of bi- and polymodal distributions and the Nonostwald behavior of disperse system. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 5, pp. 1191–1200.
12. Stakhov A.P. The «golden» number theory and new properties of natural numbers. *British Journal of Mathematics & Computer Science*, 2015, vol. 11 (6), article no. BJMCS.21385. Available at: <http://www.sciedomain.org/> (accessed 24 May 2022).
13. Melnik I.A. *Osnovy statisticheski-korrelatsionnoy interpretatsii materialov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Fundamentals of statistical-correlation interpretation of well logging materials: textbook]. Moscow, RUSSIGNS Publ., 2022. 76 p.
14. Nikitin I.A. Factors influencing and determining the nature of saturation of low-resistance reservoirs on the example of the Surgut arch field. *East European Scientific Journal*, 2021, no. 12, vol. 76, pp. 43–52. In Rus.
15. Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p.

16. Zhigulsky S.V., Tikhotsky S.A. Estimation of the crack system openness under conditions of change in the crack roughness coefficient based on data on the stress-strain state. *Specialized journal «Drilling and Oil»*, 2020, no. 7–8. In Rus. Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2020-07/30> (accessed 24 May 2022).
17. Byerlee J. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 1978, vol. 116, pp. 615–626. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00876528.pdf> (accessed 24 May 2022).
18. Barton N. Modelling rock joint behavior from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design. 1982. 118 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/236433630\\_Modelling\\_rock\\_joint\\_behavior\\_from\\_in\\_situ\\_block\\_tests\\_Implications\\_for\\_nuclear\\_waste\\_repository\\_design](https://www.researchgate.net/publication/236433630_Modelling_rock_joint_behavior_from_in_situ_block_tests_Implications_for_nuclear_waste_repository_design) (accessed 24 May 2022).
19. Barton C.A., Zoback M.D., Moos D. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology. Geological Society of America*, 1995, no. 23-8, pp. 683–686.
20. Sheng Zhang, Yang Qiao, Hong-Bao Zhao. The crack opening displacement of rock fracture process zone. 2019. DOI: 10.2298/TSCI180913214Z Available at: [https://www.researchgate.net/publication/333278411\\_The\\_crack\\_opening\\_displacement\\_of\\_rock\\_fracture\\_process\\_zone](https://www.researchgate.net/publication/333278411_The_crack_opening_displacement_of_rock_fracture_process_zone) (accessed 24 May 2022).

*Received: 26 May 2022.*

#### Information about the authors

**Igor A. Melnik**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

## КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ЖЕЛЕЗЯКИ КИРЕЕВСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ (ОБЬ-ТЫМСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ): МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ

Даулетова Айгерим Бауыржановна<sup>1</sup>,  
abd7@tpu.ru

Рудмин Максим Андреевич<sup>1</sup>,  
rudminma@tpu.ru

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

**Актуальность** работы заключается в отсутствии комплексной модели изменений геохимического цикла железа в континентальных условиях, приводящих к формированию рудных залежей. Научная проблема данной работы охватывает важные вопросы условий концентрирования железа в континентальных плиоценовых отложениях Обь-Тымской низменности.

**Цель** данных исследований заключается в выявлении минералогических особенностей условий накопления железняков на примере плиоценового Киреевского рудопроявления для оценки механизмов поступления металлов и процессов минералообразования.

**Методы:** полевые наблюдения, петрографический анализ, рентгенодифракционный анализ, сканирующая электронная микроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

**Результаты.** Преобладающими в минеральном составе континентальных залежей железняков Киреевского проявления являются сидерит и шамозит. Они указывают на субоксидные обстановки минералообразования в условиях пойменно-речных отложений. Концентрирование основных металлов, включая железо, могло происходить за счет создаваемых стабильных субоксидных условий седиментации в результате продуцирования углекислоты. Последнее зависело от активности бактериального разложения детритовой органики, регулярно привносимой поверхностными водотоками. Подобные условия подразумевают накопление алевропесчанников с железняками в донных обстановках заболачиваемых озёр, включая также пойменные равнины. Изученное континентальное залегание железняка относится к междуречью рек Обь и Томь, которое расположено в восточной части Западно-Сибирской плиты. Обь-Тымская низменность полностью наследует мезозойско-кайнозойскую отрицательную структуру – Усть-Тымскую впадину. Железняки локализованы в осадочной толще Киреевского рудного проявления. Железосодержащие слои залегают в верхней части кочковской свиты, которая сложена неогеновыми и эоплейстоценовыми отложениями.

### Ключевые слова:

Железняки, континентальные отложения, аутигенные минералы, минералогия, геохимия, Западная Сибирь.

### Введение

Осадочные железняки имеют широкое распространение в определённые периоды фанерозойской эонотемы [1–3]. Осадочные железняки – это песчано-глинистые осадочные породы, состоящие более чем на 15 % из железа в форме *in situ* минералов [4–6]. По обстановкам осаждения они подразделяются на континентальные и морские генетические типы [4, 7–10]. Континентальные железняки (или channel/continental ironstone deposit – CID) встречаются реже морских месторождений [8, 10]. В целом морские и континентальные железняки отличаются текстурно-структурными характеристиками пород, их минеральным составом и морфологией залежей. Континентальные железняки зачастую залегают среди широких вариаций литотипов (глинистые породы, алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты и т. д.) с однородной, параллельнослоистой или ко-состоистой, колломорфной, реже оoidовой структурой [4]. Континентальные железняки состоят из гидрооксидных минеральных фаз железа (гётит, гизингерит, лепидокрокит и гидрогётита), сидерита, бертиерина, шамозита и других филосиликатов [7, 10, 11]. Железовмещающие залежи в континентальных отложениях указывают на отличительные палеоусловия формирования хемогенных пород [6, 7, 10] и имеют локальное промышленное значение [8, 11, 12]. Общие ресурсы

континентальных руд существенно меньше морских [8]. Часто железняки разных типов распространены в пределах крупных единых провинций, таких как провинция Хамерсли в Австралии [13–15], Аральско-Тургайская провинция в Казахстане [8, 16–18], Западно-Сибирская провинция в России [19–21] и т. д.

### Геологическая характеристика объекта

Территория изучаемого бассейна с залежами континентальных железняков относится к междуречью рек Обь и Томь (рис. 1, А, Б), которое располагается в юго-восточной части Западно-Сибирской плиты. Обь-Тымская низменность полностью наследует мезозойско-кайнозойскую отрицательную структуру – Усть-Тымскую мегавпадину – и является районом развития аккумулятивных и эрозионно-аккумулятивных речных террас реки Обь и ее крупных притоков [4].

Изучаемые железняки локализованы в верхних горизонтах кочковской свиты, отделяющей неогеновые отложения от плейстоценовых. Кочковская свита датируется эоплейстоценом [4] и пользуется широким распространением на водораздельных пространствах исследуемой территории. В естественных обнажениях верхняя часть свиты с залежами железняков, которые послужили объектами для отбора проб и исследований, вскрывается в бассейне реки Обь [4]. В раз-

ных фациальных зонах верхний горизонт свиты включает глинистые, алевритовые, песчаные, песчано-глинистые отложения [4]. Отдельные скопления пластов железняков в верхней части кочковской свиты образуют Киреевское, Поздняковское, Казан-

ское проявления. Эти объекты Томского Приобья слабо изучены, поскольку не имеют сегодня промышленного значения, однако по археологическим данным эти руды служили источником для древней металлургии [22].

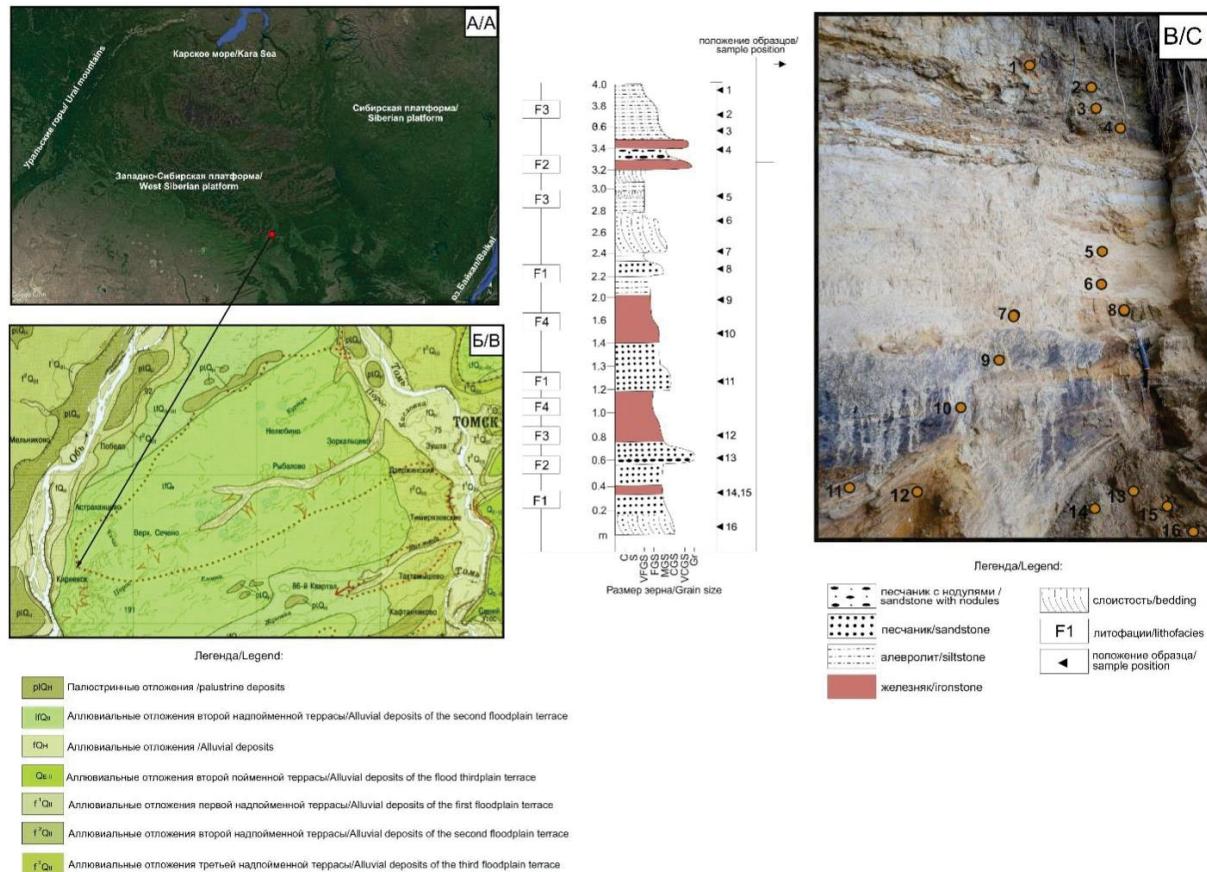


Рис. 1. А) Обзорная карта на основе Google Earth; Б) схематическая геологическая карта района; В) фото обнажения с положением образцов

Fig. 1. A) Overview map based on Google Earth; B) schematic geological map of the area; C) photos of the outcrop with sample attached

### Материал и методы

Для минералого-geoхимических исследований было отобрано шестнадцать образцов железняков и вмещающих терригенных пород Киреевского месторождения из естественных обнажений (рис. 1, В). Для петрографических исследований были изготовлены полированные шлифы с использованием стандартных шлифовальных методик. Валовый минеральный состав, включая отдельный анализ глинистой фракции, определялся методом рентгенодифракционного анализа (РДА) с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV, оснащенного источником излучения Cu-К $\alpha$  и работающего при токе 30 мА и напряжении 40 кВ. Аналитические навески анализировались при диапазоне угла дифракционного отражения ( $2\theta$ ) от 3 до 65 °С с шагом 0,02 °С со скоростью сканирования 1 с на шаг. Микроскопические исследования проводились на полированных шлифах с углеродным покрытием (толщина 15 нм) с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного детектором OXFORD X-Max 50 для ло-

кального энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа (ЭДС). Параметры СЭМ съемки были следующие: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 3,5...12,2 нА и фокусное расстояние от 4 до 15 мм. Средний химический состав различных минералов определялся путем повторных ЭДС измерений (более 10 точек на каждый минерал).

Содержания основных оксидов в аналитических образцах определялись с помощью рентгенофлуоресцентного микронализатора (РФА) HORIBA XGT 7200, работающего при токе 1 мА, диаметре сканирующего пучка 1,2 мм и напряжении 50 кВ. Препараты для РФА анализа готовились следующим образом: предварительное прессование аналитической навески и последующее плавление до 900 °С в течение 9 ч. Потери при прокаливании вычислялись как разница веса аналитической навески до и после спекания. Предел обнаружения основных оксидов составлял выше 0,001 вес. %. Рентгенофлуоресцентный микронализатор (РФА) определяет петрогенные элементы, которые далее пересчитываются на оксиды.

Микроэлементы (в г/т) были получены методом ИСП-МС на масс-спектрометре ELAN DRC-e. Точность анализа определялась серией повторностей образцов и стандартов (USGS, BCR-2, GSD-1g и SCO-1), включая собственные стандарты. Аналитическая ошибка составляла менее 3 %.

Концентрации элементов были нормированы на содержания алюминия в пробах, чтобы исключить влияние терригенной фракции при использовании геохимических индексов. Факторы обогащения (enrichment factor – EF) рассчитывались для каждой пробы по стандартной формуле. Исключение Al EF, который высчитывался следующим образом:  $Al\ EF=Al_{\text{проба}}/Al_{\text{PAAS}}$  (PAAS – средние содержания элемента в стандарте пост-архейского австралийского сланца). Индекс химического выветривания (chemical index alteration – CIA) определялся по следующей формуле:  $100 \times (Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O))$ . Ce\*, Eu\*, Y<sub>Sn</sub>/Ho<sub>Sn</sub> были получены из нормированных концентраций редкоземельных элементов (РЗЭ) на средние значения стандарта PAAS. Цериевая аномалия высчитывалась по формуле: Ce\* =  $2 \times Ce_{\text{Sn}}/(La_{\text{Sn}}+Pr_{\text{Sn}})$ , где Sn – это значения, нормированные на PAAS. Европиевая аномалия – Eu\* =  $Eu_{\text{Sn}}/(2/3 Sm_{\text{Sn}}+1/3 Gd_{\text{Sn}})$ .

## Результаты

### Литологические характеристики

#### Полевые наблюдения:

В пределах изучаемого разреза распространены отложения плиоценовой кочковской свиты, вмещающие тонкие слои, линзы и пласты с железняками. Осадочная последовательность кочковской свиты в пределах Киреевского проявления (рис. 1, В) включает следующие литотипы: железняки, гравелиты, песчаники и алевропесчаники. Пласти железняков в пре-

делах проявления имеют мощность 0,2...0,6 м и прослеживаются на 100...800 м. В разрезе железняки имеют неровную (волнистую) поверхность кровли и однородное строение пластов и линз.

#### Изучение шлифов:

Железняки (рис. 2, В) имеют желтовато-коричневый, буроватый цвет, состоят из аутигенного сидерита и терригенных обломков кварца и полевых шпатов. Текстура железняков однородная, а структура преимущественно среднезернистая. Размер зерен железняков в среднем составляет 0,2...0,5 мм. Сидерит в железняках образует цемент в ассоциации с кальцитом (рис. 3, А, Б). Иногда карбонаты характеризуются зернами идиоморфной формы.

Алевропесчаники (рис. 2, Б) имеют параллельную слоистость текстуру, желтовато-коричневый цвет и мелкозернистую структуру. Они отличаются повышенной долей алевритистых обломков и характеризуется тонкой, параллельно слоистой текстурой, наблюдаемой в обнажениях. В слоях алевропесчаника встречаются небольшие линзы серого мелокзернистого песчаника.

Песчаники (рис. 2, А) преимущественно среднезернистые с псаммитовой структурой и слабой, косо слоистой текстурой. Песчаники состоят из обломков кварца и реже из полевых шпатов. Часто в пластах песчаников отмечаются конкреции сидерита размером до 20 см в диаметре.

Гравелиты имеют буроватый оттенок, однородную, псевфитовую структуру, состоят из аллотигенного кварца и сидеритового цемента. Размеры кварцевых зерен в гравелитах варьирует в диапазоне 0,7...1,5 мм. Обломки угловатые, наиболее крупные зерна слабо окатанные. Цемент гравелитов порово-пленочный. Крупные окатанные обломки покрыты пленочным карбонатным цементом.

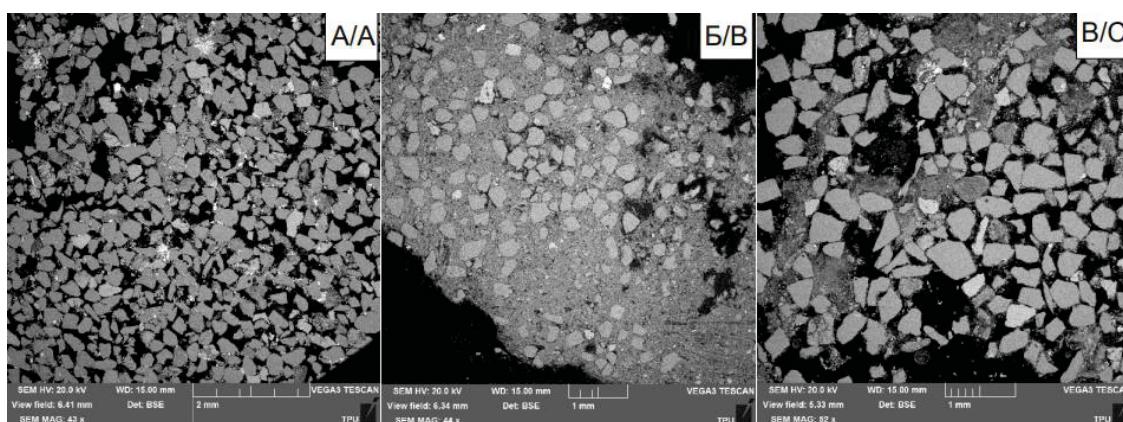


Рис. 2. СЭМ-снимки образцов в кочковской свите Киреевского проявления (А) песчаник среднезернистый, слабосцепментированный (Б) алевропесчаник с глинистыми стяжениями (В) железняк мелко-среднезернистый

Fig. 2. SEM-images of samples from the Kochkov Formation of the Kireevsk occurrence. (A) sandstone medium-grained, weakly cemented (B) siltstone with clayey nodules (C) fine-medium-grained ironstone

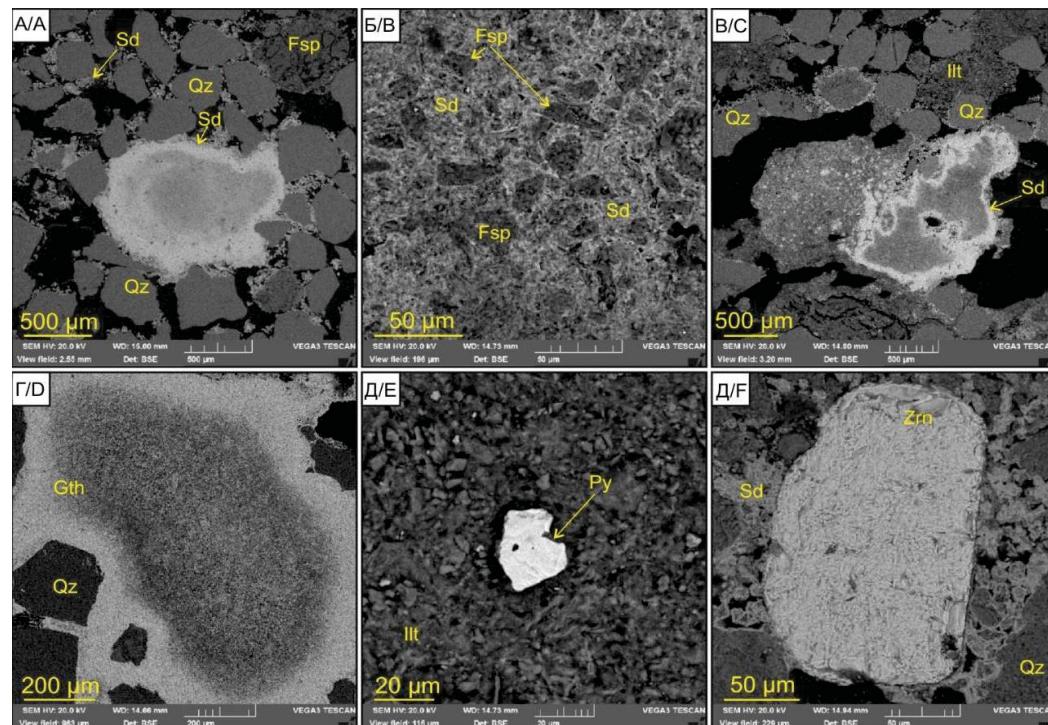
#### Минеральный состав

Минералы в отложениях Киреевского проявления подразделяются на аллотигенные (привнесенные) и аутигенные (новообразованные или *in situ*). Основные аутигенные минералы следующие (в порядке убывания): железистый хлорит (шамозит), сидерит, гётит

(гидрогётит), каолинит, иллит, смектиты, кальцит, доломит, пирит, барит, брушит и галит. В группу аллотигенных минералов входят кварц, полевые шпаты (альбит, микроклин), циркон, рутил, монацит, ильменит, магнетит, гематит, титаномагнетит. Также среди привнесенного материала присутствуют петрокласты.

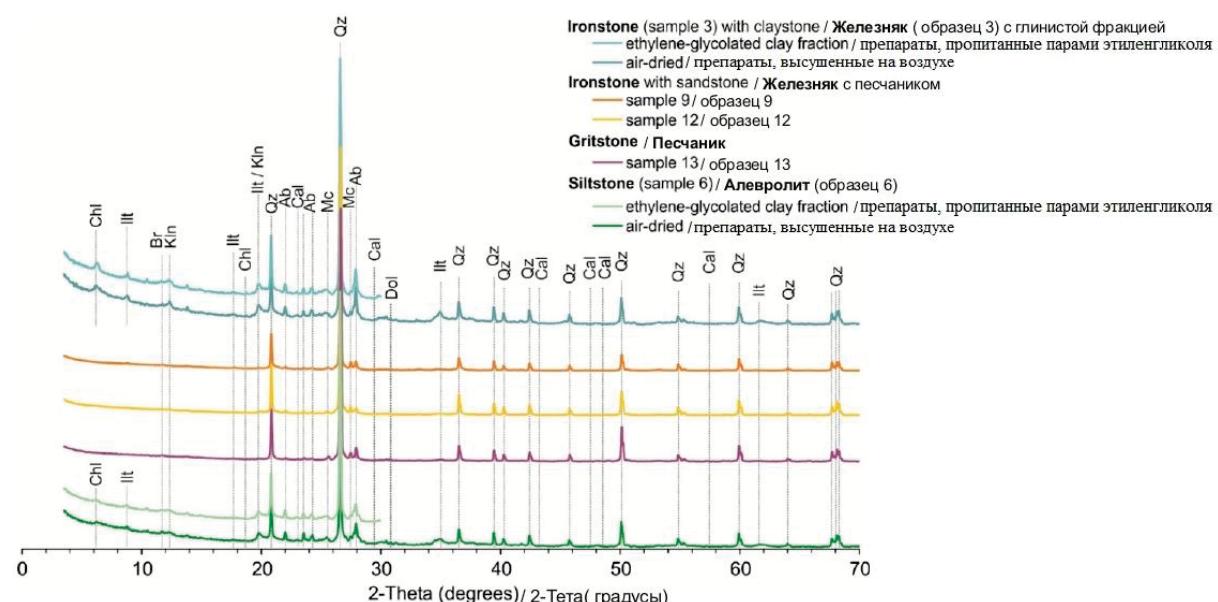
Содержание основных минералов в железовмещающей толще Киреевского проявления варьирует в следующих пределах: кварц 56...83 %, полевой шпат

13...32 %, сидерит 5...14 %, хлорит (шамозит) 1,4...5,1 % и другие минералы (гётит, кальцит, доломит, каолинит, иллит, смектиты, брушил и др.) до 5 %.



**Рис. 3.** СЭМ-снимки минералов в железняках кочковской свиты Киреевского проявления: А) сидерит в виде микроконкремций или цемента; Б) сидеритовый цемент железняков; В) пленочные формы сидерита в гравелите; Г) микроконкремции гётита; Д) пирит в иллитовом матриксе; Е) крупный акцессорий циркона среди сидеритового цемента железняка. Gth – гётит, Ilt – иллит, Py – пирит, Qz – кварц, Sd – сидерит, Zrn – циркон

**Fig. 3.** SEM-images of minerals of ironstones within the Kochkov Formation of the Kireevsk occurrence: A) microconcretion of siderite; B) siderite cement of ironstone; C) film forms of siderite in gritstone; D) microconcretions of goethite; E) pyrite in the clay matrix; F) large zircon within siderite cement of ironstone. Gth – goethite, Ilt – illite, Py – pyrite, Qz – quartz, Sd – siderite, Zrn – zircon



**Рис. 4.** Рентгеновские дифрактограммы репрезентативных образцов железняков, вмещающих пород и их глинистых фракций. Ab – альбит, Br – брушил, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Dol – доломит, Ilt – иллит, Kln – каолинит, Mc – микроклин, Qz – кварц

**Fig. 4.** XRD patterns of representative samples of the ironstones, host-rocks and their clay fractions. Ab – albite, Br – brushite, Cal – calcite, Chl – chlorite, Dol – dolomite, Ilt – illite, Kln – kaolinite, Mc – microcline, Qz – quartz

Хлориты характеризуются базальными рефлексами при 12 и 6 Å (рис. 4). Базальный рефлекс (001) смещается с 12 до 14,2 Å при анализе в высушенном и пропитанном парами этиленгликоля препаратах, соответственно, что идентифицирует эту фазу как хлорит (шамозит). Кварц отличается рефлексами 4,3; 3,4; 2,5; 2,3; 1,8; 1,5; 1,4 Å. Брушил характеризуется рефлексом (100) при 7,5 Å.

Железосодержащие породы Киреевского проявления отличаются обильным присутствием карбонат-гидрооксидной ассоциации *in situ* минералов, которая слагает как цемент, так и отдельные агрегированные образования (рис. 3, А, В, Г).

Сидерит обнаруживается в виде отдельных микроконкремций и цемента в песчаниках и железняках со средними размерами 10...50 мкм в длину (рис. 3, А, В) либо в виде кристаллического цемента (рис. 3, Б, Е). В микроконкремциях сидерита (рис. 3, А–В) отмечается концентрическая зональность, выраженная изменением фазового состава. Средний химический состав сидерита следующий: 57,7...83,2 мол. % FeCO<sub>3</sub>, до 1,8 мол. % MnCO<sub>3</sub>, до 2 мол. % MgCO<sub>3</sub>, 0,6...1,5 мол. % CaCO<sub>3</sub>.

Глинистые минералы представлены железистым хлоритом (шамозитом) и иллитом (рис. 3, В, Д). Хлорит (шамозит) образует основную массу в виде параллельно ориентированных коротко-чешуйчатых микроагрегатов в железосодержащих и терригенных породах.

Реже среди железистых минералов наблюдается гётит (или гидрогётит) в виде стяжений (рис. 3, Г) с существенно меньшим распространением относительно сидерита. Средний состав гётита Киреевского проявления следующий: Fe<sub>2</sub>O<sub>3(total)</sub> 70,1...95,9 %, SiO<sub>2</sub> 3,9...15,8 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,7...10,2 %, MnO 0,4...2,8 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,4...0,9 %, CaO 0,3...0,7 %. Гётит (рис. 3, Г) образует отдельные зёरна и их скопления в среднем размером около 50 мкм (до 600 мкм). Другой разновидностью железистых гидроокислов является аморфный или скрытокристаллический цементирующий материал железняков или алевропесчаников – гизингерит и лепидокрокит.

**Таблица 1. Основные оксиды изучаемых пород (%)**

**Table 1. Basic oxides of the studied rocks (%)**

№	Образец/Rock	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
001	Алевролит/Siltstone	0,9	1,0	16,0	54,6	0,09	1,9	0,7	1,1	0,2	15,9	7,4
002	Алевролит/Siltstone	1,4	1,2	16,0	60,6	0,09	1,8	0,9	1,1	0,2	7,4	9,4
003	Алевролит/Siltstone	1,2	1,1	16,1	59,9	0,09	1,9	0,9	1,2	0,1	9,7	7,8
004	Песчаник/Sandstone	1,0	0,3	11,2	67,8	0,09	1,4	0,6	0,7	0,1	9,8	7,1
005	Алевролит/Siltstone	1,2	1,0	16,0	68,3	0,09	1,6	0,8	1,0	0,1	3,7	6,2
006	Песчаник/Sandstone	1,6	0,1	8,9	78,4	0,09	1,7	0,3	0,3	0,0	1,8	6,9
007	Алевролит/Siltstone	1,5	0,1	10,0	77,3	0,09	1,6	0,4	0,4	0,0	2,5	6,1
008	Песчаник/Sandstone	1,2	0,0	6,5	78,5	0,09	1,3	0,3	0,3	0,1	1,8	9,9
009	Железняк/Ironstone	1,0	0,0	6,1	71	0,09	1,4	0,3	0,3	0,4	10,4	9
010	Железняк/Ironstone	0,8	0,0	7,0	71,9	0,09	1,2	0,2	0,3	0,2	10,4	7,8
011	Песчаник/Sandstone	1,0	0,0	5,8	80,2	0,09	1,2	0,2	0,2	0,0	1,5	9,8
012	Железняк/Ironstone	1,1	0,2	11,3	72,2	0,09	1,4	0,4	0,4	0,1	5,2	7,6
013	Песчаник/Sandstone	1,2	0,1	8,0	76,8	0,09	1,5	0,4	0,3	0,5	6,6	4,5
014	Железняк/Ironstone	1,2	0,0	6,9	74,8	0,09	1,7	0,4	0,3	0,2	5,1	9,4
015	Песчаник/Sandstone	1,5	0,0	8,0	79,3	0,09	1,6	0,3	0,3	0,0	1,8	7,1
016	Песчаник/Sandstone	1,8	0,1	9,7	77,2	0,09	1,8	0,4	0,3	0,0	2,3	6,3

Агрегаты кристаллов барита размером от 25 до 50 мкм и более представлены глобулярными включениями в железняках. Среди примеси в составе барита отмечается натрий (Na). Редко встречается дегритовый пирит в матриксе алевропесчаников (рис. 3, Д). Пирит характеризуется субизометрическими агрегатами размером до 27 мкм с обломочными формами. Кристаллы пирита преимущественно кубического габитуса. Также имеются зёрна циркона (рис. 3, Е) относительно крупных размеров до 500 мкм в длину.

#### Геохимия

Железосодержащие породы имеют долю валового оксида железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>общ) от 9,7 до 15,9 % (табл. 1). Валовый химический состав алевропесчаников характеризуется долей Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>общ ниже 4,8 %, при SiO<sub>2</sub> 51,0...69,0 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 11,0...14,0 %. Гравелиты в нижней части залежей отличаются повышенной долей CaO до 15,0 %.

Три группы микроэлементов можно выделить среди редких металлов (рис. 6, табл. 2) в железняках и вмещающей толще на основе их распределения относительно среднего содержания в земной горе [23, 24]. Первая группа металлов с повышенными содержаниями Zn, As, Ag, Cd, Sb. Вторая группа металлов (Cr, Ni, Cu, Zr, Sn, Cs, Hf, W, Tl, Pb, Th) характеризуется низкими содержаниями. Третья группа элементов (Co, Mo, Ba, Ta, W, Bi, U) имеет содержания близкие к кларкам и характеризуется высоким разбросом значений (кроме Ba).

Суммарное содержание РЗЭ+Y (REY) изменяется от 39,5 до 210,4 ppm (табл. 3). При этом в РЗЭ преобладает группа легких РЗЭ (LREE, 32,3–167,5 ppm) над группой тяжелых РЗЭ (HREE, 2,4–14,2 ppm), что отражается в изменении показателя LREE/HREE на уровне 10,7–13,8. Цериевая аномалия (Ce\*) выдержана пределах от 3,2 до 4,5 и характеризуется высокой флюктуацией на уровне средних значений 1,0–1,1. В целом в изучаемом разрезе отмечается слабая положительная европиевая аномалия (Eu\*) с диапазоном 0,2–0,3.

Таблица 2. Микроэлементы изучаемых пород (ppm)

Table 2. Trace elements of the studied rocks (ppm)

№	Образец/Rock	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Zr	Mo	Ag	Ba	Pb	Bi	Th	U
001	Алевролит/Siltstone	33,4	42	42,4	118	124,1	175	3,3	0,2	447,2	23	0,28	8,7	8,6
003	Алевролит/Siltstone	32,7	12,6	39,2	95,4	166,7	142	2,2	0,2	462,6	19,4	0,17	7,5	5,6
004	Песчаник/Sandstone	29,2	1,3	13,2	38,1	126,5	89,6	3,7	0,1	360,7	11,7	0,05	3,6	3,9
005	Алевролит/Siltstone	19,9	8,8	25,6	58,3	156,3	134,3	0,9	0,3	464,4	14,1	0,15	6,4	3,4
008	Песчаник/Sandstone	3,3	1,2	3,9	10,7	114,3	33,9	0,9	0,2	408,2	6,9	0,03	1,6	0,7
009	Железняк/Ironstone	19,3	0,0	7,2	18	101,2	33,2	1,4	0,1	395,1	6,1	0,04	1,7	1,4
011	Песчаник/Sandstone	3,1	0,0	3,1	40,5	88	26,8	0,6	0,2	322,8	3,9	0,03	1,2	0,6
012	Железняк/Ironstone	18,5	2,9	13,4	26,2	96	56,3	1	0,2	357,6	11,5	0,06	2,9	1,7
014	Железняк/Ironstone	9,2	0,0	5	20,8	136,4	37,1	1,1	0,2	464,5	5,9	0,0	1,8	2,3
016	Песчаник/Sandstone	4,8	0,0	5,7	20,1	161,8	48	0,2	0,1	556,8	7,6	0,0	1,9	1,3

Таблица 3. Редкоземельные элементы и иттрий в изучаемых породах (ppm)

Table 3. Rare earth elements and yttrium in the studied rocks (ppm)

№	Образец/Rock	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	REE	Ce*	Eu*
001	Алевролит/Siltstone	33,6	78,4	8,4	32,6	6,3	1,6	6,6	0,9	5,4	1	3,1	0,5	2,8	0,4	28,7	210,4	3,7	0,2
003	Алевролит/Siltstone	28,8	79,9	6,9	28,2	5,5	1,5	6,2	0,8	4,9	0,9	2,8	0,4	2,4	0,4	20,2	189,8	4,5	0,2
004	Песчаник/Sandstone	14,7	35,1	3,5	14,8	2,9	0,9	3	0,4	2,3	0,5	1,3	0,2	1,3	0,2	12,9	94,0	3,8	0,3
005	Алевролит/Siltstone	23,1	49,9	5,5	22,3	4,5	1	3,8	0,6	2,9	0,6	1,8	0,2	1,7	0,3	14,1	132,2	3,5	0,2
008	Песчаник/Sandstone	9,8	19,9	2,3	8,8	1,6	0,5	1,6	0,2	1,3	0,3	0,6	0,1	0,6	0,1	7,7	55,3	3,3	0,3
009	Железняк/Ironstone	11,2	24,7	2,6	10,4	2,4	0,6	2,4	0,4	1,8	0,4	1,1	0,2	1	0,1	10,1	69,5	3,6	0,2
011	Песчаник/Sandstone	7	14,8	1,5	6,3	1,2	0,3	1,2	0,1	0,9	0,2	0,5	0,1	0,5	0,1	4,8	39,5	3,5	0,2
012	Железняк/Ironstone	15,8	37	4,1	16,2	3,2	0,8	3,2	0,4	2,6	0,4	1,3	0,2	1,2	0,2	12,3	98,8	3,7	0,2
014	Железняк/Ironstone	10,6	22,1	2,3	9,4	2	0,5	2	0,2	1,4	0,4	0,9	0,1	0,7	0,1	7,6	60,4	3,4	0,2
016	Песчаник/Sandstone	11,7	23,1	2,6	9,9	2,1	0,5	2,1	0,3	1,5	0,3	0,8	0,1	0,8	0,1	10	65,9	3,2	0,2

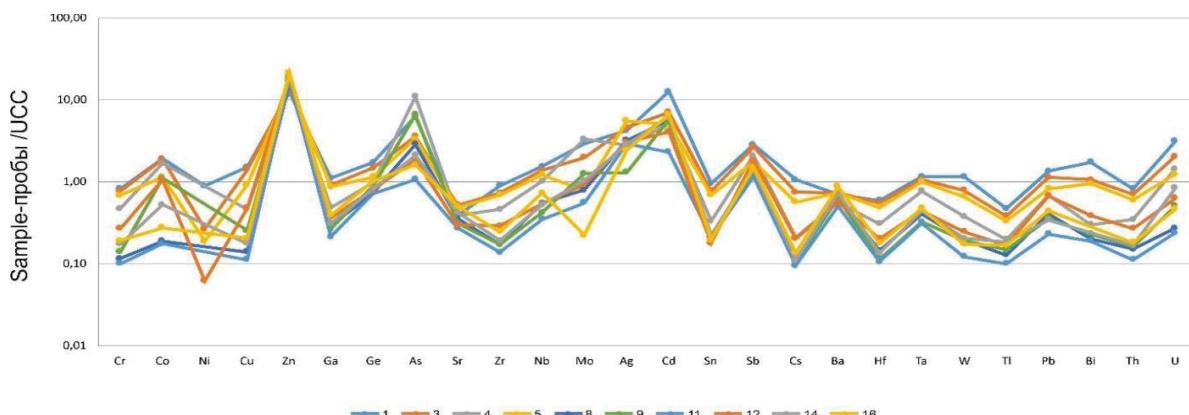


Рис. 5. Спайдер-диаграмма, показывающая диапазон концентраций микроэлементов в железняках и вмещающих породах, нормированные на средние содержания в земной коре [24, 25]

Fig. 5. Upper Continental Crust (UCC)-normalized [24, 25] spider diagrams showing the range of concentrations of trace elements in ironstones and wall rocks

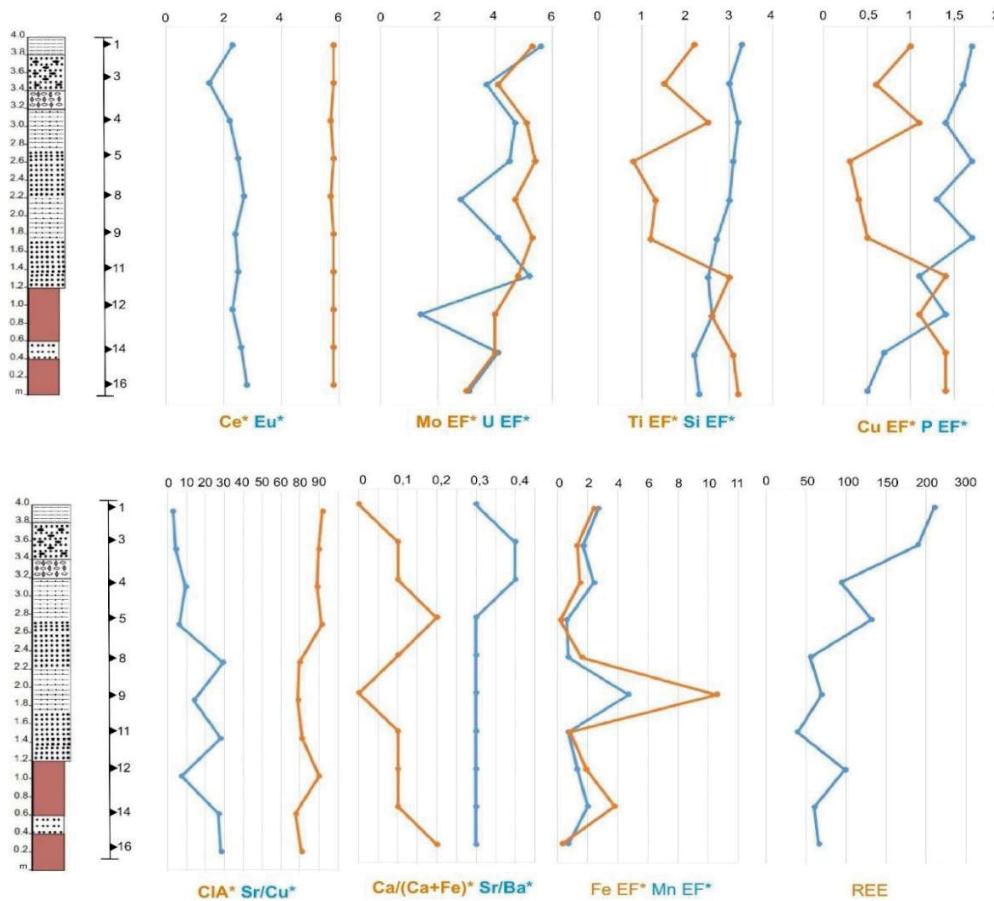
Слои железняков и песчаников совпадают с увеличением индексов биопродуктивности (Р EF, Cu EF) в изучаемом разрезе. Значения Р EF и Cu EF в двух пробах превышают порог обогащения выше 1 в интервалах накопления железняков с песчаником (рис. 6).

Показатель терригенного привноса Ti EF и Si EF имеют максимальные значения 1,8 и 3,2 (рис. 6), соответственно, в алевропесчаниках с сидеритовыми конкрециями и песчаниках. Фактор обогащения Mn повышается в железняках до значений 10,6. Фактор обогащения железа имеет синхронное поведение с Mn EF. Fe EF изменяется в железосодержащих породах в пределах 2,7...4,7 (рис. 6).

Прокси палеосоленности Sr/Ba и Ca/(Ca+Fe) имеют два схожих интервала увеличения их значения (рис. 6), которые соответствуют алевролитам и сидеритизированным конкрециям в алевропесчаниках, где

Sr/Ba достигает максимального значения 0,4. Данные тенденции схожи с изменением прокси палеоклимата (Sr/Cu). CIA увеличивается в серых алевролитах с глинистыми стяжениями в кровле изучаемого разреза до 81,8 (рис. 6).

Редокс-чувствительные прокси (Mo EF, U EF) имеют разброс значений в пределах 0,4...2,5 (рис. 6). Для железосодержащих пород значение прокси Mo EF и U EF 1,3...4,6, соответственно, выше чем для песчаников и алевропесчаников, что указывает на субокислые условия осадконакопления (дефицит кислорода в системе осадконакопления). Mo EF выше 1 отмечается во всех литотипах кроме песчаников с сидеритовыми конкрециями и алевропесчаников. U EF ниже 1 отмечается лишь в двух образцах, в интервале разреза 0,9...2,2 м в слабосцементированных желтовато-серых песчаниках и среднезернистых, слабосцементированных железняках.



**Рис. 6.** Литостратиграфическая колонка, показывающая распределение геохимических кривых  $Ce^*$ ,  $Eu^*$ , индексов обогащения ( $EF$ ) и других геохимических показателей ( $CIA$ ,  $Sr/Cu$ ,  $Ca/(Ca+Fe)$ ,  $Sr/Ba$ )

**Fig. 6.** Lithological column showing distribution of geochemical profiles of REE,  $Ce^*$  and  $Eu^*$ , elemental enrichment factors ( $EFs$ ) and geochemical proxies of  $CIA$ ,  $Sr/Cu$ ,  $Ca/(Ca+Fe)$ ,  $Sr/Ba$

### Обсуждения

Часто встречающиеся минералы в виде агрегатов и стяжений в цементе континентальных железняков Киреевского проявления отличаются преобладанием филлосиликатных или карбонатных фаз в минеральном составе. Сидерит и шамозит указывают на субоксидную обстановку минералообразования в условиях аллювиальной равнины. Концентрирование основных металлов среды, включая железо, могло происходить за счет создаваемых стабильных субоксидных условий в донной среде бассейна седиментации в результате *in situ* продуцирования углекислоты [23]. Последнее зависело от активности бактериального разложения дегритовой органики, регулярно привносимой речным водотоками [23] в пределах Киреевского проявления. Данный факт указывает на накопление алевропесчаников с железняками в донных условиях заболачиваемых озёр. Индикаторами мезотрофного и эвтрофного режима в донной части палеозёра являются слои с карбонатами. Карбонатная ассоциация характеризуется преобладанием сидерита, что соответствует условиям железистых озёр [6], в связи с чем справедливо рассматривать условия накопления богатых железом слоёв в пределах кочковской свиты как заболачиваемые палеозёра. Наличие примеси Mg в карбонатах железняков в кочковской свите говорит о благоприятных

условиях для трансформации карбонатов [23]. В озерно-болотных условиях, возможно, происходила модификация части сидерита в гётит при активном участии гуминовых кислот с локальным образованием брушиста [24, 25], который постоянно присутствует в составе железистых пород (рис. 3).

Минералогические и геохимические особенности железовмещающей толщи позволяют предположить, что переносимое рекой мобильное железо концентрировалось в застойных водах стариц озёр и болот в области палеоречной системы, совпадающей с современной долиной р. Обь. Вследствие разложения органического вещества продуцировались углекислотные анионы, которые способствовали осаждению карбонатов. В результате обмеления водоёмов происходила последующая диагенетическая трансформация новообразованных минералов, что способствовало накоплению железистых филлосиликатов и/или гётита.

На примере разрезов континентальных отложений Обь-Тымской низменности можно изучить поведение геохимического цикла железа осадков речного, делювиального, пролювиального и других генетических типов относительно морской седиментации железняков, которая была широко распространена в течение мелового и палеогенового времени [4, 6, 23, 25–28]. Их накопление на огромной равнине не могло быть

повсеместным, как в морских эпиконтинентальных бассейнах, покрывавших территорию в эпохи морских трансгрессий [13, 29, 30, 31]. Как правило, локализованные в отдельные промежутки времени, периоды континентального осадконакопления были подвержены неоднократным изменениям в связи с тектоническими и климатическими изменениями.

Разложение органического вещества и генерация  $\text{HCO}_3^-$  в условиях палеоводоёмов отражается в увеличении индексов биопродуктивности (Cu EF и P EF), что интерпретируется как благоприятная физико-химическая среда для образования карбонатов как основных аутигенных минералов. Изменение прокси терригенного привноса (Ti EF, Si EF) для отложений, предшествующих слоям алевропесчаников с сидеритовыми конкрециями и песчаниками, указывает на периоды подтопления территорий и последующего развития болотно-озерной среды. Палеосолёность среды (Sr/Ba and Ca/(Ca+Fe)) осадконакопления была выдержанна, как и значения прокси палеоклимата (Sr/Cu) и выветривания (CIA). Алевропесчаники в кровле кочковской свиты накапливались в условиях гумидизации и слабого выветривания, что отражается в изменениях Sr/Cu и CIA, соответственно. В результате эта обстановка способствовала осаждению органики. Увеличение факторов обогащения Fe и Mn можно связать с иммобилизацией этих металлов в биогеохимическом цикле речной системы как следствие минералообразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. – Oxford: Blackwell, 1985. – 674 p.
2. Van Houten F.B. Review of cenozoic ooidal ironstones // *Sedimentary Geology*. – 1992. – V. 78. – P. 101–110.
3. Xing B., Graham N., Yu W. Transformation of siderite to goethite by humic acid in the natural environment // *Communications Chemistry*. – 2020. – V. 3. – P. 1–11.
4. Архипов С.А., Мартынов В.А. Кочковский горизонт Западной Сибири и его возрастные аналоги в смежных районах. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1980. – 452 с.
5. Bekker A., Kovalick A. Ironstones, iron formations and iron ore // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. – 2020. – V. 2. – P. 1–8.
6. Сурков В.С. Неогеновая эволюция молодой Урало-Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2002. – V. 43. – P. 754–761.
7. Microbially mediated iron ore formation, Silicic Superunit, Rudabánya, Hungary / S. Bodor, M. Polgári, I. Szentpéteri, J. Földessy // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – V. 72. – P. 391–401.
8. Роль сдвиговых разломов в позднепалеозойско-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтас-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатой зоны / М.М. Буслов, Т. Ватанабе, Л.В. Смирнова, И. Фуджива, К. Ивата, И. де Граве, Н.Н. Семаков, А.В. Травин, А.П. Кирьянова, Д.А. Кох // Геология и геофизика. – 2003. – V. 44. – P. 49–75.
9. Geochemical and mineralogical features of the substrates of the Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia / M. Rudmin, M.J. Wilson, L. Wilson, O. Savichev, T. Yakich, M. Shalbybin, A. Ruban, R. Tabakaev, K. Ibraeva, A. Mazurov // *CATENA*. – 2020. – V. 194. – P. 1–12.
10. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. – 2014. – V. 3. – P. 1–51.
11. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. II. Three-dimensional mineralogical characterization of the Rocklea channel iron deposit, Western Australia / M. Haest, T. Cudahy.
12. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. I. Validation of mineral abundance and composition scripts at the Rocklea channel iron deposit in Western Australia / M. Haest, T. Cudahy, C. Laukamp, S. Gregory // *Economic Geology*. – 2012. – V. 107. – P. 229–249.
13. Западно-Сибирский железорудный бассейн / Н.Х. Белоус, И.В. Николаева, Ю.В. Казанский, А.П. Бердников, В.М. Кляровский, В.П. Кузнецов, А.А. Бабин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1964. – 230 с.
14. Ramanaidou E.R., Morris R.C., Horwid R.C. Channel iron deposits of the Hamersley Province, Western Australia // *Australian Journal of Earth Sciences*. – 2003. – V. 50. – P. 669–690.
15. Simonson B.M., Schubel K.A., Hassler S.W. Carbonate sedimentology of the early Precambrian Hamersley Group of Western Australia // *Precambrian Research*. – 1993. – V. 60. – P. 287–335.
16. Chemostratigraphy and sedimentary facies analysis of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin, NW China: implications for tight oil exploration / C. Liu, K. Liu, X. Wang, L. Wu, Y. Fan // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – V. 178. – P. 96–111.
17. Paleoenvironmental conditions of Cretaceous ironstone deposit formation in Chulyum-Yenisey basin (Western Siberia) / M. Rudmin, S. Banerjee, A. Dauletova, A. Ruban // *Minerals*. – 2021. – V. 11. – P. 1–21.
18. Страхов Н.М. Железорудные фации и их аналоги в истории Земли (опыт историко-геологического анализа процесса осадконакопления). – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 267 с.
19. Сравнительный анализ разрезов и биоты морского палеогена Западной Сибири и Арктики / М.А. Ахметьев, Н.И. Запарожец, А.И. Яковлева, Г.Н. Александрова, В.Н. Беньяновский, Т.В. Орешкина, З.Н. Гнибиденко, Ж.А. Доля // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2010. – V. 18. – P. 635–659.
20. Oscillating redox conditions in the Vocontian Basin (SE France) during Oceanic Anoxic Event 2 (OAE 2) / J. Danzelle, L. Riquier,

Наиболее родственные по условиям образования меловые континентальные железняки Чулымо-Енисейской впадины [25] отличаются пониженными содержаниями Ва по отношению к континентальным железнякам кочковской свиты.

## Заключение

Проведенные исследования позволили получить следующие основные выводы.

Основными аутигенными минералами изученных залежей являются: карбонаты (сидерит и кальцит), хлориты (шамозит), филосиликаты (иллит, смектиты). Алевропесчаники в кровле кочковской свиты накапливались в условиях гумидизации и слабого выветривания, что отражается в изменении Sr/Cu и CIA, соответственно. Эта обстановка способствовала осаждению органики.

Предполагается, что переносимое рекой морильное железо первично концентрировалось в застойных водах старичных озёр и болот палеоречной системы. Вследствие разложения органического вещества происходило продуцирование углекислоты и формирование карбонатов. В результате их последующей диагенетической трансформации часть железа проникала в слабо восстановительные и окислительные условия от пойменно-озерных до прибрежно-русловых фаций, что способствовало накоплению железистых филосиликатов и/или гётита.

*Работа выполнена при поддержке Российской научно-технической конференции по проблемам геологии и геохимии недр и минераловедения. Работа выполнена в рамках гранта № 20-77-00007.*

- F. Baudin, C. Thomazo, E. Pucéat // *Chemical Geology*. – 2018. – V. 493. – P. 136–152.
21. Николаева И.В. Бакчарское месторождение оолитовых железных руд. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1967. – 134 с.
22. Водясов Е.В., Асочакова Е.М. В поисках железных рудников: геоархеологический взгляд // Сибирские исторические исследования. – 2020. – V. 170. – P. 188–231.
23. Authigenic and detrital minerals in peat environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia / M. Rudmin, A. Ruban, O. Savichev, A. Mazurov, A. Dauletova, O. Savinova // *Minerals*. – 2018. – V. 8. – P. 1–13.
24. Brucite-aragonite precipitates as weathering products of historic non-MgO-based geomaterials / J. Martínez-Martínez, D. Benavente, N. Fusi, J.C. Cañaveras // *Minerals*. – 2020. – V. 10. – P. 599–629.
25. Poulton S.W., Canfield D.E. Development of a sequential extraction procedure for iron: Implications for iron partitioning in continentally derived particulates // *Chemical Geology*. – 2005. – V. 8. – P. 214.
26. Van Houten F.B., Bhattacharyya D.P. Phanerozoic oolitic ironstones – geologic record and facies model // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1982. – V. 10. – P. 441–457
27. Poulton S.W., Canfield D.E. Development of a sequential extraction procedure for iron: Implications for iron partitioning in continentally derived particulates // *Chemical Geology*. – 2005. – V. 214. – P. 209–221.
28. Raiswell R., Canfield D.E. The iron biogeochemical cycle past and present // *Geochemical Perspectives*. – 2012. – V. 1. – P. 220–232.
29. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia // *Marine and Petroleum Geology*. – 2019. – V. 100. – P. 309–325.
30. Ooidal ironstones in the Meso-Cenozoic sequences in western Siberia: assessment of formation processes and relationship with regional and global earth processes / M. Rudmin, S. Banerjee, E. Abdullayev, A. Ruban, E. Filimonenko, E. Lyapina, R. Kashapov, A. Mazurov // *Journal of Palaeogeography*. – 2020. – V. 9. – P. 1–21.
31. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin / A.E. Kontorovich, S.V. Ershov, V.A. Kazanenkov, Y.N. Karogodin, V.A. Kontorovich, N.K. Lebedeva, B.L. Nikitenko, N.I. Popova, B.N. Shurygin // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – P. 582–609.

Поступила 15.05.2022 г.

#### Информация об авторах

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

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.26:552.142:553.21

## CONTINENTAL IRONSTONES OF THE KIREEVSK OCCURRENCE (OB-TYM DEPRESSION): MINERAL FORMATION AND GEOCHEMISTRY

Aigerim B. Dauletova<sup>1</sup>,  
abd7@tpu.ru

Maxim A. Rudmin<sup>1</sup>,  
rudminma@tpu.ru

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

**The relevance** of the work consists in absence of a multifactor model of a change of geochemical iron cycle in the continental environment led to accumulation of iron-bearing sediments. The scientific issue covers questions about formation conditions of iron precipitation in Pliocene continental deposits of Ob-Tym depression.

**The main aim** of this work is to reveal mineralogical and geochemical features of ironstone sedimentation on the example of Pliocene Kireevsk occurrence to assess metal sources, the mechanisms of their migration and mineral formation.

**Methods** include field observation, petrographic analysis, X-ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence analysis (XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

**Results.** Siderite and chamosite are predominate in situ minerals of channel ironstone deposit. They indicate to suboxic conditions of mineral formation in the alluvial plain. The major metals precipitation, including iron, could occur in the stable suboxic conditions in the bottom environment due to a carbon dioxide production. This depends on a microbial decomposition of detrital organic matter regularly inputted by river watercourses. This factor indicates the aleuropellic accumulation with ironstone in waterlogged lakes conditions. The studied continental ironstone occurrence belongs to the interfluvial of the Ob and Tom rivers, which is located in the eastern part of the West Siberian Plate. The Ob-Tuim lowland completely inherits the Mesozoic-Cenozoic negative structure – the Ust-Tym uplift. The ironstones are localized in the sedimentary sequence of the Kireevsk ore deposit. Iron-bearing layers occur at the top of the Kochkov Formation, which is composed of Neogene and Pleistocene sediments.

### Key words:

Ironstones, channel deposits, authigenic minerals, mineral formation, geochemistry, Western Siberia.

The research was supported by the Russian Science foundation within the grant no. 20-77-00007.

### REFERENCES

1. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Oxford, Blackwell, 1985. 674 p.
2. Van Houten F.B. Review of cenozoic ooidal ironstones. *Sedimentary Geology*, 1992, vol. 78, pp. 101–110.
3. Xing B., Graham N., Yu W. Transformation of siderite to goethite by humic acid in the natural environment. *Communications Chemistry*, 2020, vol. 3, pp. 1–11.
4. Arhipov S. A., Martynov V. A. *Kochkovsky gorizont Zapadnoy Sibiri i ego vozrastnye analogi v smezhnykh rayonakh* [Kochkov horizon of Western Siberia and its age analogues in adjacent areas]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 452 p.
5. Bekker A., Kovalick A. Ironstones, iron formations, and iron ore. *In Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2020, vol. 2, pp. 1–8.
6. Surkov V.S. Neogenovaya evolutsiya molodoy Uralo-Sibirskoy platformy [Neogen evolution of the young Ural-Siberian platform]. *Geologiya i Geofizika*, 2002, no. 43, pp. 754–761.
7. Bodor S., Polgári M., Szentpétery I., Földessy J. Microbially mediated iron ore formation, Silicic Superunit, Rudabánya, Hungary. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 72, pp. 391–401.
8. Buslov M.M., Watanabe T., Smirnova L.V., Fujiwara I., Iwata K., De Grave I., Semakov N.N., Travin A.V., Kiryanova A.P., Kokh D.A. Rol sdivigovykh razlomov v pozdnepaleozoyskoy rannemezozoyskoy tektonike i geodinamike Altai-Sayanskoy i Vostochno-Kazakhstanskoy skladchatoy zony [Role of strike-slip faults in Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonics and geodynamics of the Altai-Sayan and East Kazakhstan folded zone]. *Geologiyai Geofizika*, 2003, no. 44, pp. 49–75.
9. Rudmin M., Wilson M.J., Wilson L., Savichev O., Yakich T., Shalbybin M., Ruban A., Tabakaev R., Ibraeva K., Mazurov A. Geochemical and mineralogical features of the substrates of the Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *CATENA*, 2020, vol. 194, pp. 1–12.
10. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *In Treatise on Geochemistry*, 2014, vol. 3, pp. 1–51.
11. Haest M., Cudahy T., Laukamp C., Gregory S. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. II. Three-dimensional mineralogical characterization of the rocklea channel iron deposit, Western Australia. *Economic Geology*, 2012, vol. 107, pp. 229–249.
12. Haest M., Cudahy T., Laukamp C., Gregory S. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. I. Validation of mineral abundance and composition scripts at the rocklea channel iron deposit in Western Australia. *Economic Geology*, 2012, vol. 107, pp. 209–228.
13. Belous N.C., Nikolaeva I.V., Kazansky Yu.P., Berdnikov A.P., Klyarovskiy V.M., Kuznetsov V.P., Babin A.A. *Zapadno-Sibirskiy zhelezorudny bassey* [The Western-Siberian iron ore basin]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1964. 230 p.
14. Ramanadou E.R., Morris R.C., Horwid R.C. Channel iron deposits of the Hamersley Province, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2003, vol. 50, pp. 669–690.
15. Simonson B.M., Schubel K.A., Hassler S.W. Carbonate sedimentology of the early Precambrian Hamersley Group of Western Australia. *Precambrian Research*, 1993, vol. 60, pp. 287–335.
16. Liu C., Liu K., Wang X., Wu L., Fan Y. Chemostratigraphy and sedimentary facies analysis of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin, NW China: Implications for tight oil exploration. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 178, pp. 96–111.
17. Rudmin M., Banerjee S., Dauletova A., Ruban A. Paleoenvironmental conditions of Cretaceous ironstone deposit formation in Chulym-Yenisey basin (Western Siberia). *Minerals*, 2021, vol. 11, pp. 1–21.

18. Strakhov N.M. Zhelezorudnye fatsii i ikh analogi v istorii Zemli (opyt istoriko-geologicheskogo analiza protsessa osadkonakopleniya) [Iron ore facies and their analogues in the Earth's history: experience of historical-geographical analysis of sedimentary processes]. *Trud IGN AN SSSR. Geol. Ser. publ.*, 1947, vol. 22, pp. 261–267.
19. Akhmetev M.A., Zaporozhets N.I., Iakovleva A.I., Aleksandrova G.N., Beniamovsky V.N., Oreshkina T. V., Gribidenko Z.N., Dolya Z.A. Sravnitelny analiz razrezov i bioty morskogo paleogena Zapadnoy Sibiri i Arktiki [Comparative analysis of marine paleogene sections and biota from West Siberia and the Arctic Region]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2010, vol. 18, pp. 635–659.
20. Danzelle J., Riquier L., Baudin F., Thomazo C., Pucéat E. Oscillating redox conditions in the Vocontian Basin (SE France) during Oceanic Anoxic Event 2 (OAE 2). *Chemical Geology*, 2018, vol. 493, pp. 136–152.
21. Nikolaeva I.V. *Bakcharskoe mastorozhdenie oolitovykh zheleznykh rud* [Bakchar oolitic iron ore deposit]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1967. 134 p.
22. Vodyasov E.V., Asochakova E.M. V poiskakh zheleznykh rudnikov: geoarkheologicheskiy vzglyad [In search of iron ore mines: a geo-archaeological perspective]. *Sibirskie istoricheskie issledovaniya*, 2020, vol. 170, pp. 188–231.
23. Rudmin M., Ruban A., Savichev O., Mazurov A., Dauletova A., Savinova O. Authigenic and Detrital Minerals in Peat Environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia. *Minerals*, 2018, vol. 8, pp. 1–13.
24. Martínez-Martínez J., Benavente D., Fusi N., Cañavera J.C. Brucite-Aragonite Precipitates as Weathering Products of Historic Non-MgO-Based Geomaterials. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 599–629.
25. Poulton S.W., Canfield D.E. Development of a sequential extraction procedure for iron: Implications for iron partitioning in continentally derived particulates. *Chemical Geology*, 2005, vol. 8, pp. 214.
26. Van Houten F.B., Bhattacharyya D.P. Phanerozoic oolitic ironstones – geologic record and facies model. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1982, vol. 10, pp. 441–457.
27. Poulton S.W., Canfield D.E. Development of a sequential extraction procedure for iron: Implications for iron partitioning in continentally derived particulates. *Chemical Geology*, 2005, vol. 214, pp. 209–221.
28. Raiswell R., Canfield D.E. The iron biogeochemical cycle past and present. *Geochemical Perspectives*, 2012, vol. 1, pp. 220–232.
29. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, vol. 100, pp. 309–325.
30. Rudmin M., Banerjee S., Abdullayev E., Ruban A., Filimonenko E., Lyapina E., Kashapov R., Mazurov A. Ooidal ironstones in the Meso-Cenozoic sequences in western Siberia: assessment of formation processes and relationship with regional and global earth processes. *Journal of Palaeogeography*, 2020, vol. 9, pp. 1–21.
31. Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Karogodin Y.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., Shurygin B.N. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 582–609.

Received: 15 May 2022.

#### Information about the authors

**Aigerim B. Dauletova**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.131

## РОЛЬ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕПРОВОДА «ЧАЯНДА-ВСТО»

Строкова Людмила Александровна<sup>1</sup>,  
sla@tpu.ru

Нечаев Дмитрий Андреевич<sup>1</sup>,  
nechaevdmitryf@gmail.com

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

**Актуальность** работы определена важностью обеспечения бесперебойной работы трубопроводного транспорта, обуславливающего энергетическую и экономическую безопасность страны. Проявления опасных геологических процессов могут привести к сбоям в работе трубопроводов с последствиями, варьирующимися от травм/смерти, воздействия на окружающую среду и материального ущерба до длительных перебоев в обслуживании и невыполнения поставленных задач. Отказы в работе трубопроводов в результате природных явлений, как правило, являются редкими (но дорогостоящими) событиями. Именно поэтому важно правильно оценить грунтовые условия и предсказать их изменение при эксплуатации трубопровода. **Цель:** идентифицировать участки трассы с вероятной активацией опасных геологических процессов и их влияние на эксплуатацию сооружения.

**Методы:** анализ результатов инженерных изысканий по обустройству Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения и данных геотехнического мониторинга по трассе нефтепровода.

**Результаты.** Проведено описание инженерно-геологических условий трассы нефтепровода. Наиболее распространенными опасными геологическими процессами в пределах трассы трубопровода являются карст, заболачивание, водная эрозия, а также проявления геокриологических процессов – термозерозия, термокарст, морозное пучение, морозное трещинообразование, наледеобразование. Определены участки проявления геологических процессов по трассе трубопровода. Наиболее протяженными оказались процессы, связанные с изменением многолетнемерзлых грунтов и карстовые процессы. Оценка вклада опасных геологических процессов произведена по секциям между узлами запорной арматуры нефтепровода, что позволяет обеспечить безопасность транспортировки нефти, ее регулировку за счет отключения участка линейной части трубопровода. Идентифицированы наиболее уязвимые участки трассы нефтепровода по возможности проявления геологических опасностей.

### Ключевые слова:

Нефтепровод, инженерно-геологические условия, карст, эрозия, наледи

### Введение

В связи со стратегической важностью объектов транспорта углеводородов к эксплуатации трубопроводных систем предъявляются особые требования для обеспечения безопасной и безостановочной работы как магистральных, так и внутрипромысловых трубопроводов. Запуск трубопроводной системы транспортировки нефти с нефтяной оторочки Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) в республике Саха (Якутия) в магистральный нефтепровод (МНП) Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО) в 2019 г. повысил качество и скорость транспортировки углеводородов. С учетом сложного рельефа местности и экстремальных природно-климатических особенностей региона нефтепровод построен в подземном исполнении. Для исключения влияния трубопровода на многолетнемерзлые грунты при строительстве использовались теплоизолирующие материалы. Однако развитие опасных геологических процессов усложняет условия эксплуатации инженерных систем нефтепровода.

В настоящее время отечественными и зарубежными учеными проведено множество исследований по оценке ОГП на трубопроводах. В работах [1–8] уделяется внимание оценке инженерно-геологических условий и их типизации при проектировании трубопроводов в криолитозоне. Примеры типологического районирования территорий представлены в работах [9–20]. Этот метод широко используется в инженерной практике, т. к. позволяет упорядочить имеющиеся разнородные знания об инженерно-геологических особенностях территории. Тем не менее этому методу присуща субъективность в выделении типов геологической среды.

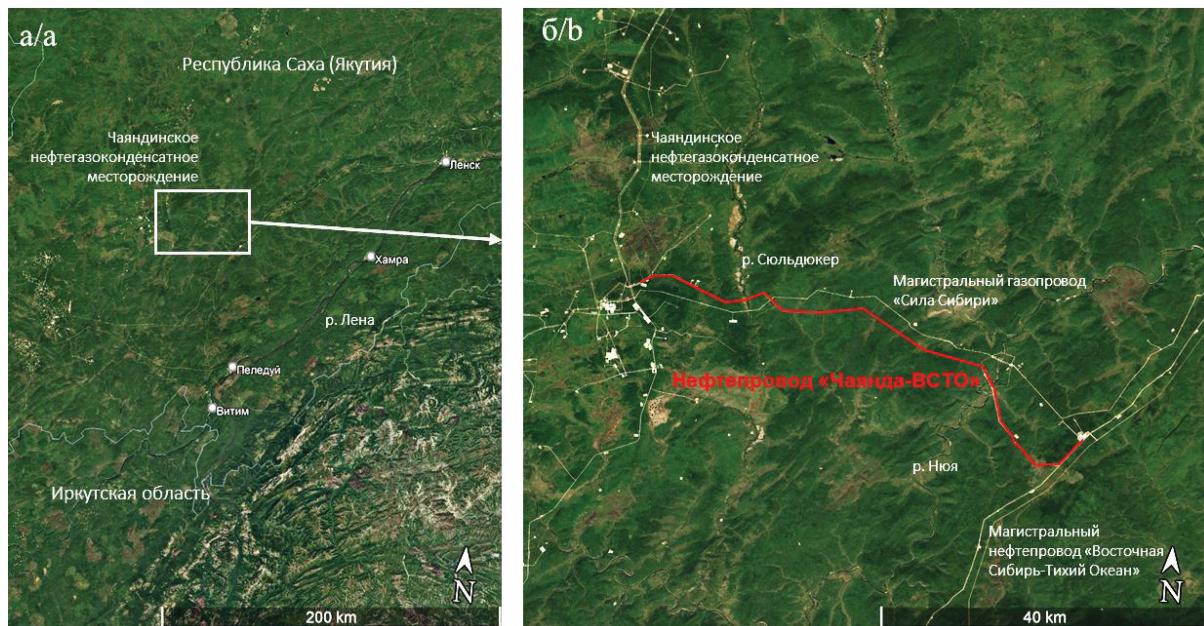
В последние несколько лет ГИС-технологии с мощными инструментами визуализации, анализа и моделирования, которые учитывают большое количество факторов, влияющих на процессы и объекты, широко используются в инженерно-геологической оценке и районировании территории [21–29]. Для определения веса факторов при классификации объектов широко используются традиционные методы, такие как метод анализа иерархий (АИР), анализ главных компонент [11, 13, 18]. Машинное обучение, нечеткая логика открыли новые возможности для описания, обработки и анализа многомерных данных о сложных разнонаправленных антропогенных воздействиях на окружающую среду и ее реакции. В этой связи заслуживают внимания работы [19–24]. Вышеупомянутые результаты исследований имеют большое значение для охраны и управления природными ресурсами, безопасности и бесперебойной ра-

боты инженерных систем нефтепровода.

боты инженерных сооружений в районах добычи и транспортировки полезных ископаемых. Научно обоснованный анализ и оценка состояния нового нефтепровода «Чаянда-ВСТО» обеспечат необходимыми средствами контроль угроз безопасности трубопровода, станут важнейшей научной основой для его мониторинга и управления в случае стихийных бедствий.

Цель данной работы – идентифицировать участки трассы с вероятной активацией опасных геологических процессов и их влияние на эксплуатацию сооружения.

Трасса напорного нефтепровода «Чаянда-ВСТО» протяженностью 69 км (рис. 1) расположена в Ленском улусе республики Саха (Якутия).



#### Инженерно-геологические условия трассы нефтепровода

Климат изучаемой территории резко-континентальный, с большими амплитудами температур в течение года: с очень низкими зимними температурами воздуха (средняя месячная температура января в районе нефтепровода составляет минус 30,3 °C, с отметкой абсолютного минимума температуры в январе – минус 61 °C) и высокими температурами воздуха в летний период (средняя месячная температура июля в районе нефтепровода составляет 16,9 °C, абсолютный максимум – 36 °C). Осадки на исследуемой территории распределяются неравномерно в течение года, максимальное количество осадков приходится на теплый период (июль–август). Ветровой режим зависит от циркуляции воздушных масс и изменяется в течение года: в зимний период времени преобладают слабые северные ветра, что в свою очередь обуславливает стабильные низкие температуры, в летний период – ветра с западной стороны. Максимальные скорости ветра в течение года зафиксированы в период резкого изменения температурного режима – в мае, и составляют порядка 1,6...2,4 м/с. Климат изучаемой территории влажный, с умеренно теплым летом и умеренно сухой снежной зимой относится к северной строительно-климатической зоне с наиболее суровыми условиями [30].

Гидрография изучаемой территории развитая, с постоянными и временными водотоками, с показателем густоты речной сети – 0,34 км/км<sup>2</sup>. Практически все сравнительно крупные реки, расположенные на месторождении и по трассе нефтепровода, текут в меридиональном направлении, исключением являются мелкие водотоки и река Нюя. Трасса нефтепровода пересекает одиннадцать постоянных водотоков, наиболее крупные из них – реки Нюя, Сюльдюкээр, Керемнике, ручьи Кубалах, Чуонда, Куччугуй-Уяннях и др. Большая часть водотоков по трассе нефтепровода относится к бассейну реки Нюи – левому притоку реки Лены, впадающему в нее на 2420 км от устья. Длина Нюи составляет 798 км, площадь водосбора 38100 км<sup>2</sup>.

Гидрогеологические условия. На характер подземных вод большое влияние оказывает распространение многолетнемерзлых грунтов, которые образуют водонепроницаемый экран. Поэтому на территориях со сплошным и островным распространением мерзлых грунтов имеют место быть надмерзлотные воды сезонноталого слоя и воды несквозных таликов. На всех плоских или слабонаклонных междуречных массивах и речных террасах, сложенных хорошо фильтрующими четвертичными отложениями и трещиноватыми коренными породами, формируются сквозные талики. Подземные воды этих отложений вскрываются на

глубине от 0 до 8,3 м. Все встреченные подземные воды характеризуются спорадическим распространением. К особому типу подземных вод на изученной территории можно отнести трещинные и трещинно-карстовые воды, приуроченные к трещинам и карстовым пустотам в толще коренных пород. По отношению к многолетнемерзлым породам эти воды находятся в сквозных таликах. Проведенный химический анализ показал относительно невысокую минерализацию – 0,3 г/л, и гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав воды. Источник питания таких вод – в основном атмосферные осадки, поверхностный сток с водосборов, реки.

В геоморфологическом отношении трасса нефтепровода располагается в пределах структурно-денудационного Приленского закарстованного плато, которое находится на юге Среднесибирского плоскогорья, в среднем течении реки Лены. Приленское плато является возвышенной равниной, со средними абсолютными высотами 300–600 м. Отметки по трассам меняются в пределах от 245 м (р. Нюя) на урезах воды и до 550–560 м на водоразделах. Рельеф Приленского плато, расчлененного достаточно густой речной сетью, в основном грядовый. На территории месторождения имеются карстовые блюдца и воронки, поноры, суходолы, полья, термокарстовые котловины, бугры пучения, наледные поляны, делли. Ландшафт трассы нефтепровода относится к типу таёжных и мерзлотнотаёжных, в основном со среднетаежными лиственничными лесами и редколесьями. По всей тер-

ритории распространены заболоченные территории, в долинах рек – незначительные участки лугов.

В тектоническом отношении трасса нефтепровода расположена в южной части Сибирской платформы, прежде всего в границах восточной части Непского свода Непско-Ботубинской антеклизы. Территория трассы представлена отложениями ордовика и кембрия, которые сжаты в протяженные складки в виде гребней, формирование которых непосредственно связано с протекающими в конце силура процессами интенсивной складчатости (развитие Ангаро-Ленского прогиба). Гребневидные складки, характеризующиеся падающими разрывами (надвигами) в юго-восточном направлении, тянутся вдоль границы Байкало-Патомского нагорья на северо-восток (рис. 2). В пределах рассматриваемого участка следует выделить Нюйскую впадину, характеризующуюся асимметричным строением, ширина которой составляет 160...170 км, а протяженность – более 260 км. Прогнутая часть впадины, смещенная на юго-восток в сторону Уринского антиклинария, представлена отложениями силурийского возраста. На востоке к складкам Нюйской впадины примыкает Пеледуйское поднятие – сводообразная структура с интенсивной складчатостью, расположенная в верхнем течении реки Нюи и далее спускающаяся на территории бассейнов рек Пеледуй и Хамра. На юге Пеледуйское поднятие отделяется от Патомской складчатой области узким синклинальным прогибом, а на севере примыкает к Олдонской зоне разломов.

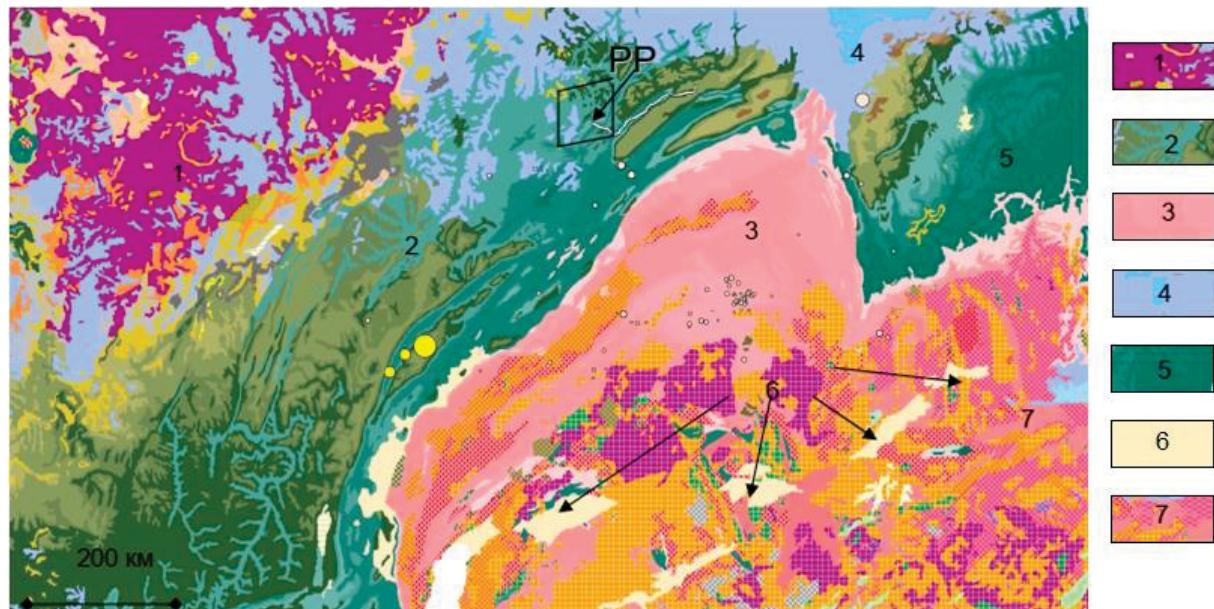


Рис. 2. Основные тектонические структуры южной части Сибирской платформы и ее обрамления, по А.М. Никишину [31]: 1 – Тунгусская синеклиза, 2 – Ангаро-Ленская ступень, 3 – Байкальская метаплатформенная область, 4 – южная часть Вилюйской синеклизы, 5 – Алданская моноклиза, 6 – грабены Байкальской рифтовой зоны (BRZ), 7 – Алдано-Становская область. РР – Район работ.

Fig. 2. The main tectonic structures of the southern part of the Siberian platform and its framing [31], where 1 – Tunguska syneclyse, 2 – Angara-Lena step, 3 – Baikal metaplatform region, 4 – southern part of the Vilyui syneclyse, 5 – Aldan monoclyse, 6 – grabens of the Baikal rift zone (BRZ), 7 – Aldano-Stanovaya region. RR – study area

Согласно карте общего сейсмического районирования России ОСР-97-В масштаба 1:8000000, состав-

ленной в Институте физики Земли РАН специально для проектирования строительства особо ответствен-

ных и экологически опасных объектов, северная часть объектов изысканий попадает в зону низкой сейсмичности – 5 баллов, юго-восточная – 6 баллов по шкале MSK-64.

*Геологическое строение исследуемой территории.* Однозначно, все геологические процессы рассматриваемой территории определяются в значительной мере составом и свойствами коренных пород. В пределах трассы нефтепровода выделяют следующие формации коренных пород:

- карбонатная нижнекембрийская и среднекембрийская: сложена брекчированными доломитами с прослойями известняков, мергелей, гипса и известковистых песчаников.
- терригенно-карбонатная средне-верхнекембрийская (красноцветная): наиболее распространенная по территории, представлена на исследуемой территории доломитами (с прослойми гипса) и алевролитами. Породы представленной карбонатной формации (известняки и доломиты), как правило, трещиноватые, кавернозные и закарстованные. Алевролиты в основном микрослоистые, карбонатные (10...26 %), с карбонатно-глинистым и железистоглинистым поровым цементом, очень нестойкие к выветриванию. Эти отложения получили широкое распространение в полосе трассы нефтепровода. Вскрытая мощность отложений изменяется от 2,0 до 18,3 м;
- терригенная нижнеордовикская и средневерхнеордовикская формация: слагает волнисто-пологую увалистое плато в восточной части участка работ, характеризуется песками, алевролитами, глинами. Продукты выветривания по составу в основном песчаные и супесчаные. Вскрытая мощность отложений изменяется от 1,0 до 6,0 м;
- терригенная нижнеюрская: имеет распространение в основном в пределах структурно-денудационной плоской равнины и грядово-холмистого плато, на очень ограниченных участках некоторых рек (например, на территории реки Сыпаранда и ручья Джелокан). Продукты выветривания по составу в основном песчаные и супесчаные. Вскрытая мощность отложений изменяется от 2,0 до 12,5 м.

*Четверичные отложения* на исследуемой территории распределены неравномерно по мощности. Сложный характер строения обусловлен условиями залегания: от 0,5 м на некоторых участках до 13,0 м. Четверичные отложения по трассе нефтепровода представлены различными образованиями, а именно:

- Элювиально-делювиальными отложениями ( $edQ_{IV}$ ). Щебенисто-песчано-глинистые отложения в площадном отношении господствуют в пределах трассы нефтепровода. Распространены на поверхностях выравнивания и в пределах денудационных равнин. Вершины сопок сложены глыбово-щебенисто-дресвяными породами с супесчаным, реже суглинистым заполнителем. Петрографический состав крупнообломочной составляющей в своем большинстве (90...95 %) представлен поро-

дами скального основания. Это преимущественно доломиты и известняки. Мощность накапливающихся продуктов разрушения зависит от возраста поверхности выравнивания и скорости выветривания коренных пород. Вскрытая мощность грунтов изменяется от 0,5 до 7 м.

- Делювиальные отложения ( $dQ_{IV}$ ). Делювиальный горизонт имеет типичные лессовидные признаки – это суглинки и супеси с содержанием пылеватой фракции до 61 %. Они полностью покрывают пологие склоны с градусом наклона 3...12° и встречаются у подножий склонов, крутизна которых менее 6°. Мощность данных отложений составляет 1...9 м.
- Элювиальные отложения ( $eQ_{N-Q}$ ) занимают значительные площади в пределах изучаемых участков и развиты на водораздельных пространствах и преимущественно в верхних участках склонов. Состав образований согласуется с составами коренных пород. Залегают отложения на глубине от 0,3 до 20,0 м. Вскрытая мощность грунтов изменяется от 2 до 14,6 м.
- Делювиально-коллювиальные и коллювиальные ( $dc, cQ_{III-IV}$ ) отложения приурочены к средним (10–20°) и крутым (более 20°) участкам склонов и представлены, как правило, щебенисто-дресвяными породами с супесчаным заполнителем. Его мощность 1,0–5,0 м. Состав образований согласуется с составами коренных пород.
- Верхнечетвертичные аллювиальные ( $aQ_{III}$ ) отложения слагают III надпойменную террасу, а верхнечетвертичные аллювиальные отложения ( $aQ_{III-IV}$ ) слагают II и I надпойменные террасы рек Чаянда, Нюя. Надпойменные террасы сложены супесями, суглинками, гравийно-галечными породами, реже песками и супесями гравелистыми. Мощность данных отложений составляет 4–10 м.
- Голоценовые аллювиальные отложения ( $aQ_{II}$ ), которые в основном встречаются в поймах рек и долинах небольших (средних и мелких) водотоков, представляются в пределах изучаемой территории различными породами, которые в основном переслаиваются, однако встречаются и монолитные участки. Аллювий обычно состоит из двух фаций: русловой (мощность до 4...14 м), представленной песками, галечниками, гравийными грунтами и пойменной (мощность 1...13 м), сложенной в нижней части галечниками и гравийными грунтами с линзами и с прослойми песков и супесей, в верхней – глинами, суглинками и илами. В пределах трасс аллювиальные образования представлены на участке перехода через р. Нюя, р. Пеледуй, где они слагают верхнюю часть разреза русла, поймы. На остальных пересекаемых трассой водотоках аллювиальные отложения представляют собой нерасчлененную толщу, где очень трудно (а фактически эта возможность отсутствует) выделить делювий и аллювий, так как деятельность водотоков, как правило, приурочена к весеннелетнему благоприятному периоду года, когда пи-

тание происходит за счет инфильтрации поверхностных вод и разгрузки надмерзлотных водоносных горизонтов. Мощность отложений изменяется от 1,0 до 14,0 м.

- Голоценовые озерно-болотные ( $lbQ_{IV}$ ) отложения приурочены к заболоченным понижениям на водоразделах и к верховьям долин временных водотоков. В основе отложений выделяют два слоя: нижняя часть представлена оторфованными суглинками, глинами и элювиальными суглинками, верхняя же часть представлена торфом (в среднем мощность оценивается в пределах 0,3…4,0 м). Встречаются горизонты погребенного минерализованного торфа мощностью 0,2…12,6 м. Горизонты погребенного торфа зафиксированы на глубине 2,6…12,9 м. Общая мощность озерно-болотных накоплений преимущественно составляет 3…5 м, максимально – 5…8 м.

*Геокриологические условия трассы нефтепровода* характеризуется чрезвычайной пестротой и сложностью, частой сменой участков различного распространения ММГ по площади и в разрезе, разнообразием геотемпературных условий и существенным диапазоном изменения мощности. Распространение мерзлых толщ меняется от островного на юге и юго-востоке до сплошного в северной части изучаемой территории. Вскрытая мощность многолетнемерзлых грунтов изменяется от 1,5 до 19,5 м. Температура мерзлых грунтов на исследованной территории, на глубине 10 м, изменяется от минус 0,05 до минус 4,1 °C.

К основным факторам, влияющим на температуру пород, относятся: экспозиция склонов, снежный и растительный покровы, состав и свойства пород, конденсация и фильтрация влаги, охлаждающее влияние зимних ветров. На крутых склонах выпадающие осадки почти полностью переходят в поверхностный сток, поэтому повышение температуры пород связано в основном с экспозицией склонов. Определенные закономерности в распределении температуры пород по площади связаны с генезисом и географическим местоположением таликов.

Исходя из материалов инженерно-геологических изысканий по трассе нефтепровода, выделены следующие типы многолетнемерзлых пород (ММП):

- сплошное распространение ММП, залегающих с поверхности: мерзлые породы занимают более 90 % площади выдела, температура средняя годовая – от минус 0,4 до минус 2,6 °C;
- прерывистое распространение ММП, залегающих с поверхности: мерзлые породы занимают от 50 до 90 % площади, на 10…50 % площади – кровля ММП заглублена на 3…10 м, или ММП отсутствуют, температура средняя годовая от минус 0,1 до минус 1,7 °C;
- островное, редкоостровное распространение ММП, залегающих с поверхности: мерзлые породы занимают менее 10 % площади выдела, более чем на 80 % площади ММП отсутствуют, температура средняя годовая от нуля до минус 1,1 °C. На этой территории встречаются участки ММП с температурой от минус 1,8 до минус 4,1 °C.

Криогенная толща существует непрерывно, по крайней мере, с начала среднего плейстоцена. Коренным дочетвертичным породам, промерзвшим эпигенетически, свойственны массивные и унаследованные по трещинам, пластам и кавернам криогенные текстуры. В песчаных толщах юры отмечается массивная криотекстура. Глинистые сланцы, алевролиты, песчаники, мергели, известняки и доломиты кембрия, а также породы трапповой формации имеют унаследованную пластово-трещинную криотекстуру, часто с неполным заполнением трещин льдом.

Среднечетвертичные тонкодисперсные осадки (суглинки, глины) отличаются высокой льдистостью и большим разнообразием криогенных текстур. Ледяные включения верхнечетвертичных супесей и суглинков представлены тонкими линзочками и прослойками (рис. 3), а также синкриогенными жилами льда и захороненными жилами льда. В аллювиальных отложениях поймы песчано-илистого состава с включением органики, формирующейся с позднеголоценового времени в условиях промерзания, наблюдаются горизонтально-слоистая и массивная криогенные текстуры, в старицах осадках – слоистая и слоисто-сетчатая.

Озерно-болотные отложения, представленные оторфованными суглинками, отличаются высокой суммарной льдистостью. Ледяные включения образованы тонкими шлирами, линзами и льдом – цементом. В озерных отложениях присутствуют мощные (до 10 см) шлиры и небольшие линзы инъекционного льда.

Рыхлые четвертичные отложения на площади представлены преимущественно супесчано-суглинистыми разностями небольшой мощности (до 0,5…7,0 м) от нельдистых до сильнольдистых, от твердых до пластичных и текучих по консистенции. При оттаивании сильнольдистых грунтов часто происходят значительные осадки. Следовательно, целесообразно использование грунтов по I принципу для области сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Необходимо отметить, что малая мощность четвертичных отложений позволяет в качестве оснований использовать коренные породы, особенно в южной, юго-восточной части площади с островным и редкоостровным распространением ММГ. А при наличии в основании скальных грунтов и несплошного развития мерзлоты возможно использование принципа II СП 25.1330.2020.

*Геологические и инженерно-геологические процессы исследуемого участка.* Широкое распространение ММГ является одним из основных факторов, наравне со свойствами и особенностями коренных и четвертичных пород и климатическими особенностями исследуемой территории, который определяет наличие и развитие современных геологических процессов по трассе нефтепровода. Криогенные процессы представлены в основном морозным пучением грунтов, термокарстовыми формами рельефа, а также наледями, морозобойным трещинообразованием, эрозией. Распространение некоторых геологических процессов по трассе нефтепровода представлено на рис. 4.



**Рис. 3. Ледяные включения верхнечетвертичных супесей и суглинков представлены тонкими линзочками и прослойками**  
**Fig. 3. Thin lenses and layers represent ice inclusions of Upper Quaternary sandy loams and loams**

Одним из процессов, определяющих сложность трассы нефтепровода в инженерно-геологическом контексте, является карст. В связи с широким распространением карбонатных пород по трассе нефтепровода карстовые процессы встречаются по всей трассе. Особая активность карста выявлена в ослабленных трещиноватых зонах на выровненных поверхностях карбонатных гряд, являющихся в свою очередь ядрами антиклинальных складок. Изменение температуры многолетнемерзлых грунтов, увеличение поверхностного стока вод, изменение в связи с антропогенным вмешательством химического состава грунтовых вод, направления и характера водотоков, повреждение поверхностного слоя почвы (в том числе и изменение четвертичных отложений) – все эти факторы приводят к активации карбонатного карста повсеместно по трассе нефтепровода.

В пределах исследуемой территории развиты как древний (погребенный) карст, так и современный карст, представленный в виде карстовых блюдец, карстовых воронок и локальных оседаний грунта. При вскрытии карстовых воронок заполняющими породами в основном являются суглинки мягкопластичной консистенции, суглинки элювиальные твердой консистенции, суглинки элювиальные мерзлые и нельдистые, супеси пластичные, пески пылеватые. Карстующиеся скальные доломиты и скальные известняки залегают относительно неглубоко, некоторые залегают на глубине 0,6 м.

Наибольшее распространение эрозионных процессов по трассе нефтепровода наблюдается в долинах водотоков, а их интенсивность непосредственно зависит от скорости потока. В связи с достаточно резким подъемом воды в весенний паводок и увеличением

объема и скорости потока наибольшее распространение получила боковая эрозия. Также присутствует плоскостная эрозия, которая протекает в сочетании с процессом термоэрозии, которая свойственна участкам, непосредственно прилегающим к речным долинам. Механизм денудации в основном обусловлен опережающим оттаиванием мерзлых пород и последующим их размывом.

Криогенные процессы при прерывистом и островном распространении мерзлых пород помимо активации процессов сезонного пучения приводят и к образованию наледей. По трассе нефтепровода наледи в основном встречаются на переходах нефтепровода с водотоками и проявляются в виде частичного или же полного замерзания водотока. По происхождению наледи подразделяются на наледи подземных вод (надмерзлотных), наледи поверхностных вод, смешанные наледи подземных и поверхностных вод. Также распространены наледи вод мелких несквозных таликов, развитых под ручьями.

Процесс сезонного пучения грунтов распространен повсеместно по трассе нефтепровода, с наибольшими показателями пучения на участках стока вод и долинах водотоков, в связи с наличием благоприятных факторов для его развития: небольшая глубина залегания грунтовых вод (менее 3 м) и водонасыщенность грунтов. Наибольшая интенсивность процесса достигается в периоды низких температур – с января по март. На территориях, подверженных заболачиванию, сезонное пучение грунтов достигает порядка 0,5 м, а многолетнее пучение представлено на территории буграми высотой 1...2 м. Водоразделы и склоны с грунтами небольшой влажности и глубоким залеганием грунтовых вод менее подвержены процессу пучения грунта, ми-

нимальная величина бугров пучения на таких участках составляет порядка 0,01...0,02 м. В соответствии с СП

115.13330.2016 более 75 % территории трассы нефтепровода оценивается как весьма опасная.

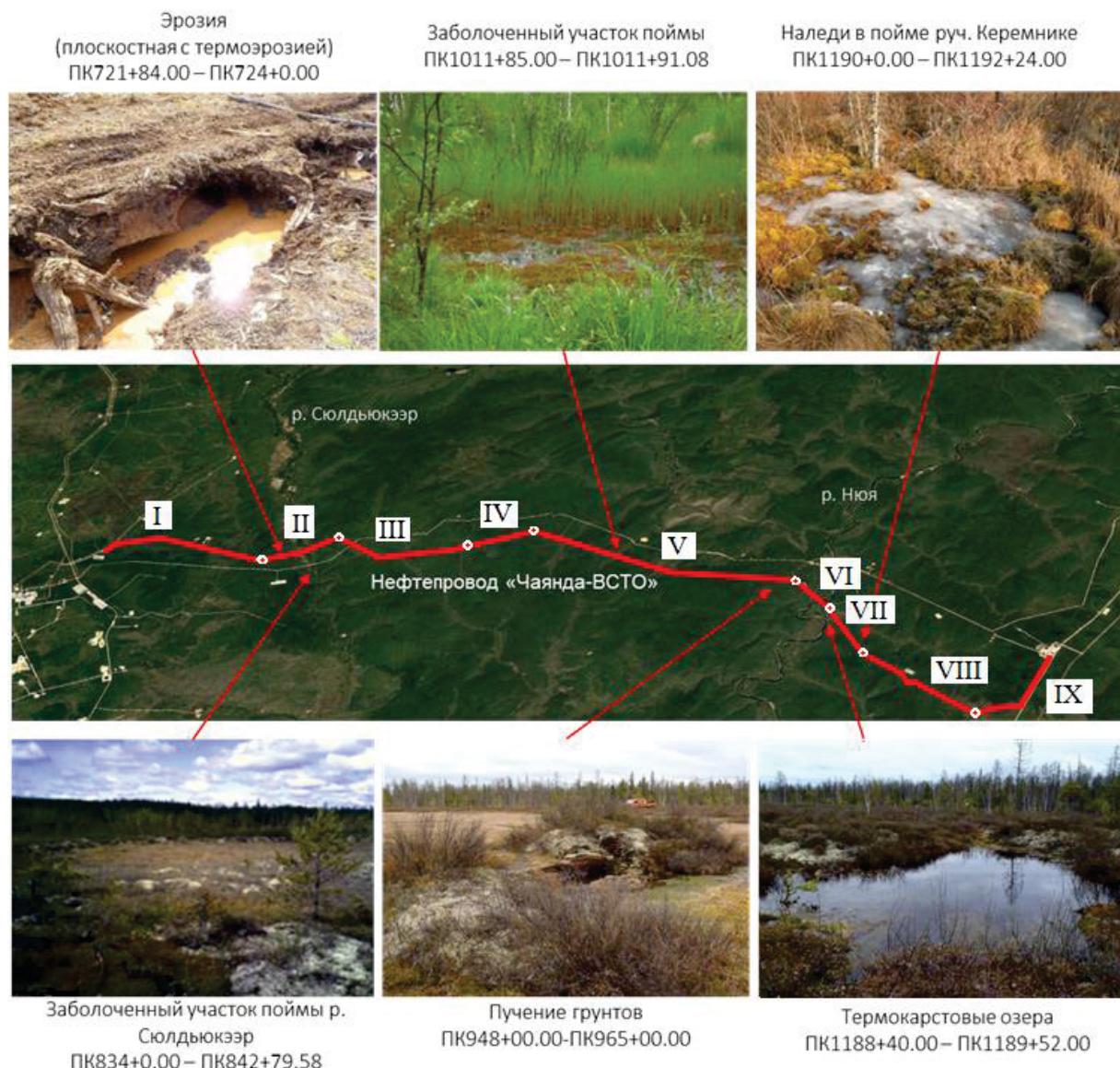


Рис. 4. Распространение некоторых геологических процессов по трассе нефтепровода

Fig. 4. Distribution of geological processes along the route of the oil pipeline

Влияние геокриологических условий в сочетании со сложным рельефом, геоморфологическим и литологическим строением активизирует процесс заболачивания. Стоит отметить, что заболачивание территории распространено не повсеместно по трассе нефтепровода – наибольшая заболоченность зафиксирована на территориях водоразделов, характеризующихся плоским строением и слабодренированными свойствами пород, на переувлажненных участках – долины и поймы рек и ручьев, подножия склонов и седловины. Также имеются участки на территориях площадочных объектов линейной части вследствие изменения естественных условий, главным образом изменения поверхности и подземного стока. Наличие выдержаных суглинистых отложений под почвенно-растительным слоем, служащих водоупором много-летнемерзлых пород, является основным фактором

заболачивания территории. Питание заболоченных участков осуществляется атмосферными осадками и паводковыми водами.

Термокарстовые процессы на исследуемой территории развиваются вследствие изменения теплового режима мерзлых грунтов и наблюдаются в основном на участках сильнольдистых озерно-болотных отложений, аллювиальных отложений пойм и надпойменных террас. Крупными термокарстовыми формами являются озера, мелкие формы термокарста – блюдца, западины, мочажины – именно они повсеместно встречаются по трассе нефтепровода. Активация термокарста предполагает скопление вод в неглубоких западинах, глубиною до 1,0...1,5 м. Вода, накапливающаяся в канавах, оказывает отепляющее влияние на отложения и тем самым повышает их среднегодовую температуру, что, в свою очередь, приводит

к увеличению глубины протаивания грунтов. Термо-карстовые ложбины (при благоприятных условиях) развиваются до полного вытаивания жильных льдов и постепенно перерастают в обширные заболоченные понижения. Однозначно, одной из причин современной активизации процесса протаивания пород по исследуемой территории считается производственное воздействие на природную среду, проявляющееся прежде всего в разрушении почвенно-растительного покрова, что влечет за собой резкое увеличение глубины сезонного оттаивания. В соответствии с СП 115.13330.2016 категория опасности природных процессов по термокарсту на отдельных участках (потенциальная площадная пораженность территории более 25...75 %) оценивается как опасная.

#### Методика выполнения работ

Исследование, проведенное в отделении геологии ТПУ, включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях при проектировании трассы, их обобщение и анализ. Так, на первоначальном этапе были выделены участки по трассе нефтепровода, характеризующиеся определенными технологическими параметрами трубопровода: узлы запорной арматуры, переходы с байпасными линиями и др. В итоге трасса нефтепровода поделена на девять ключевых участков. Далее, используя данные инженерно-геологических изысканий, продольные разрезы трассы нефтепровода, фактические материалы по территории исследования, были идентифицированы участки проявления различных опасных геокриологических и геологических процессов (карст, заболачивание, наледеобразование, эрозия, предрасположенность к пучению грунтов) и их протяженность для каждого из участков трубопровода. Полученные численные значения протяженности участков, на которых наблюдается развитие опасных геологических процессов, использовались для определения удельного веса всех идентифицированных проявлений ОГП на каждом из девяти участков. Оценку удельного веса предлагается определять используя следующую формулу (1):

$$\gamma = \frac{\sum_{i=0}^n l_i}{L}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – удельный вес воздействия опасных геологических процессов на определенном участке трассы трубопровода, уд. ед.;  $l_i$  – протяженность участка, на котором обнаружено развитие опасного геокриологического или же геологического процесса;  $n$  – количество участков, подверженных воздействию определенного опасного геокриологического или же геологического процесса;  $L$  – протяженность исследуемого участка трассы трубопровода, м.

Полученные значения протяженности каждого отдельного инженерно-геологического процесса трассы позволяют выявить относительный вклад определенного процесса на определенном участке в формирование потенциальной возможности развития опасных условий эксплуатации трубопровода.

#### Результаты

На основании полученной методики оценки для каждого участка определены показатели удельного веса воздействия опасных инженерно-геологических процессов, что дало возможность ранжировать участки трассы трубопровода по степени опасности (рис. 5). Предложено выделить следующие участки: особо опасные (удельный вес воздействия более 90 % от участка), опасные (удельный вес воздействия более 60 % от участка), умеренно-опасные (удельный вес воздействия более 30 % от участка), неопасные (удельный вес воздействия не более 30 % от участка).

*Особо опасные участки трассы – участки III и IV* – согласно предложенной методике, характеризуются сильно развитыми геокриологическими процессами. Прерывистое распространение ММГ, характеризующееся распространением мерзлых пород как с дневной поверхности, так и на глубине нескольких метров в виде отдельных участков мерзлых пород, а также наличие на рассматриваемой территории мелких водотоков предрасполагает к образованию морозных пучений грунтов и морозобойных трещин, активации термокарстовых процессов и эрозии. Участки удалены от промысловой автодороги, не имеют постоянных проездов для обеспечения непрерывного мониторинга, что, в свою очередь, негативно сказывается на эксплуатации нефтепровода.

*Опасный участок VI* представляет собой переход через р. Нюю, поэтому на данном участке особо развиты процессы наледеобразования, заболачивания и карстовые процессы. Геокриологические условия участка представлены островным распространением многолетнемерзлых грунтов несливающегося и сливающегося типов. Таким образом, не исключена возможность активации процессов боковой и донной эрозии, сезонного пучения грунтов. В рельефе преобладают крутые наклонные поверхности (от 1,5 до 9 градусов), что также представляет сложности при эксплуатации подводного перехода нефтепровода.

*Опасный участок IX* представляет особый интерес в связи с наличием на нем протяженных закарстованных территорий, которые расположены непосредственно в зоне прокладки нефтепровода. Антропогенное вмешательство, которое заключается в нарушении почвенно-растительного слоя и изменения рельефа местности, во время строительства объекта и при его эксплуатации приводит к увеличению поверхности стока вод, изменению температуры многолетнемерзлых грунтов, что в свою очередь однозначно будет влиять на увеличение активности карстовых процессов.

*Территория умеренно-опасных участков II, V, VII, VIII* в основном характеризуется распространением многолетнемерзлых грунтов островного и прерывистого типов, наличием на участках водотоков, которые подвержены процессу наледеобразования и эрозии. Территории реки Сюлдюкээр (участок II) и ручья Куччугуй-Утнянях (участок V) заболоченные, с достаточно сложным рельефом.

## Линейная пораженность участков трубопровода ОГП, %

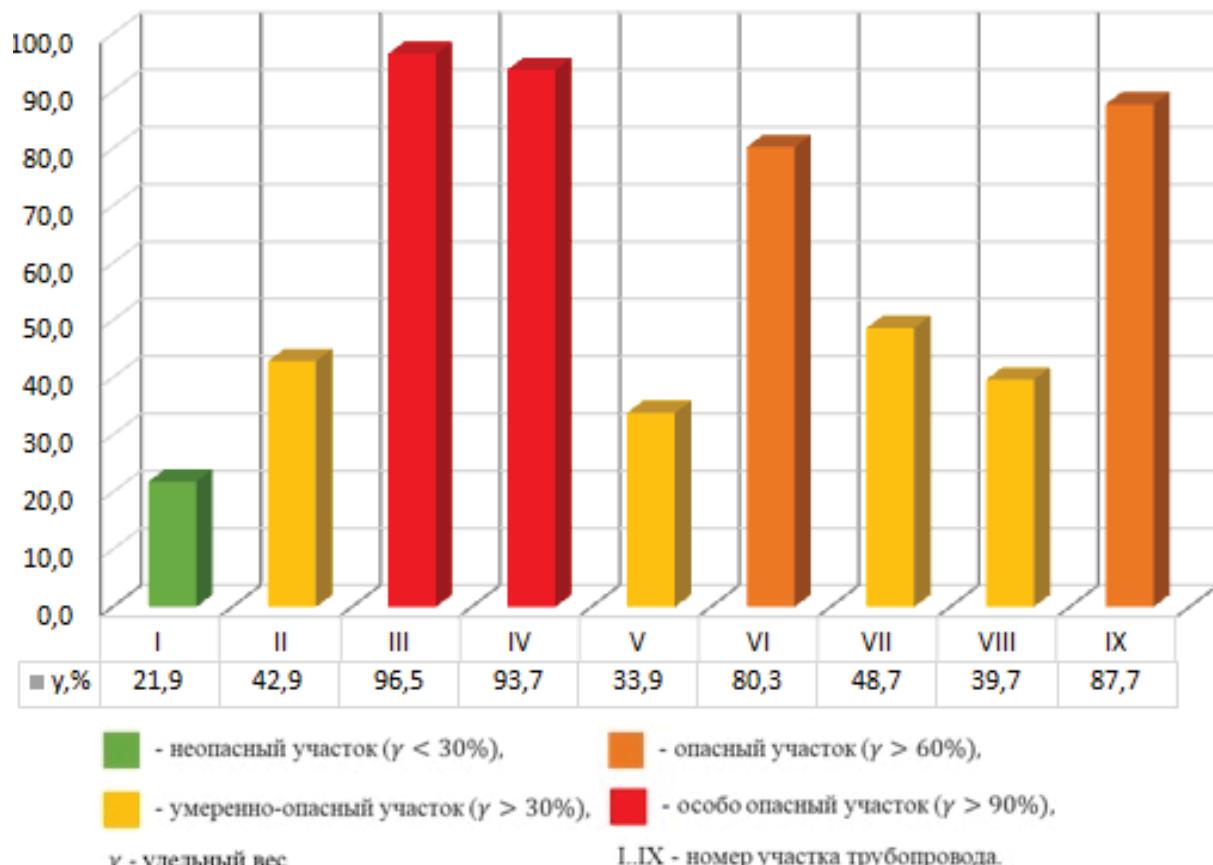


Рис. 5. Линейная пораженность участков трубопровода опасными геологическими процессами  
 Fig. 5. Linear distribution of dangerous geological processes in the pipeline sections

Неопасный участок I представляет собой достаточно открытую местность расположенной поверхности, с незначительным уклоном. Стоит отметить, что на данном участке имеют место быть эрозионные процессы (в пределах пересечения трубопроводом лощины). Участок проходит в относительной близости к промышленной автодороге и незначительно удален от объектов инфраструктуры, что в свою очередь также положительно влияет на эксплуатацию нефтепровода.

### Обсуждение результатов исследования

Анализируя относительный вклад каждого выявленного геологического процесса в формирование потенциальной возможности развития опасных условий эксплуатации, стоит отметить, что наибольший вклад вносят геокриологические условия территории (рис. 6). Участки, подверженные воздействию криогенных процессов, составляют 41,9 % общей длины трассы нефтепровода. На участке трассы нефтепровода, ограниченного пикетами ПК705+65.00-ПК920+00.00, определено прерывистое, а также островное распространение многолетнемерзлых грунтов. Начиная с ПК920+00.00 выделяется островное распространение многолетнемерзлых грунтов. Поэтому именно на первом из выделенных участков зафиксированы особо опасные участки по наличию и степени воздействия опасных геологических процессов на нефтепровод.

Порядка 6,1 % от общей протяженности трассы нефтепровода расположено в районах с активными карстовыми процессами. Стоит отметить значительную протяженность карстовых территорий на конечных участках трассы трубопровода (начиная с ПК 1245+00.00 и до конца трассы нефтепровода).

Также немалый вклад в осложнение эксплуатации трубопровода вносят карстовые процессы. Порядка 6,1 % от общей протяженности трассы нефтепровода расположено в районах с активными карстовыми процессами. Стоит отметить значительную протяженность карстовых территорий на конечных участках трассы трубопровода (начиная с ПК 1245+00.00 и до конца трассы нефтепровода). Однозначно, необходимо дополнительное изучение влияния на нефтепровод таких геокриологических и физико-геологических образований, как одиночно расположенные зоны сезонного пучения грунтов, карстовые воронки и бледца, перелетки.

Несмотря на то, что результаты идентификации участков требуют конкретизации и проверки, представленные на данном этапе исследования результаты наглядно демонстрируют разнообразие физико-геологических процессов и различия участков трассы по степени опасности активации тех или иных процессов, которые могут негативно воздействовать на целостность трубопровода.

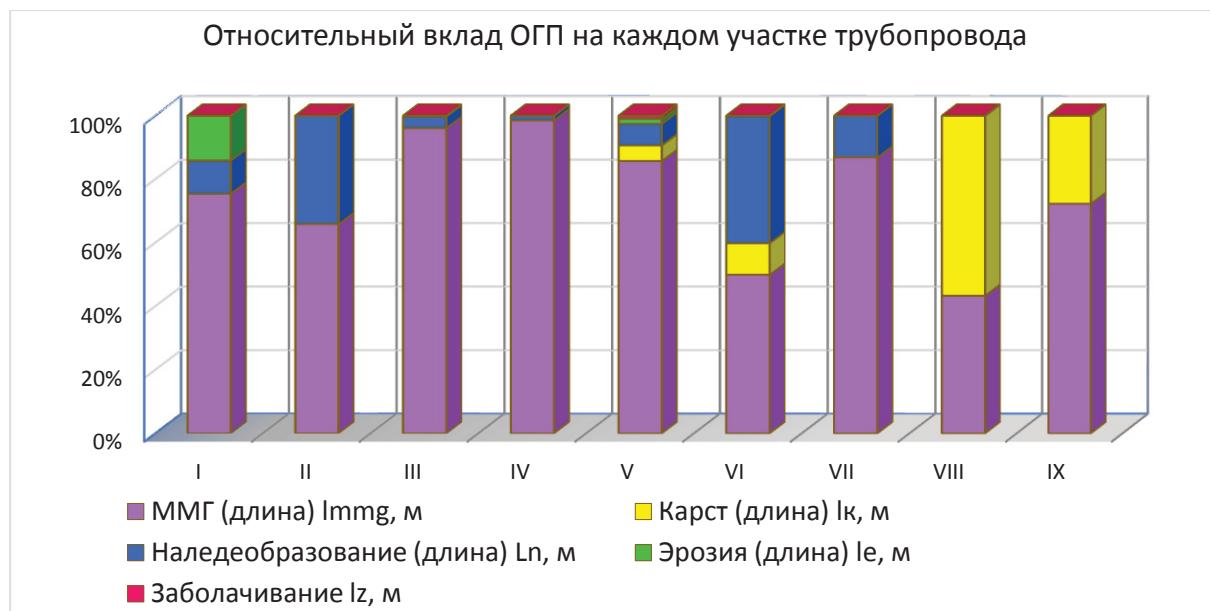


Рис. 6. Относительный вклад опасного геологического процесса на каждом участке

Fig. 6. Relative contribution of hazardous geological process in each area

### Выводы

- При проведении исследований территории трассы нефтепровода на данном этапе дана подробная физико-географическая и геологическая характеристика района. Особые климатические условия, характеризующиеся большими амплитудами температур, особенности тектоники и рельефа местности, густая сеть водотоков, в совокупности с особенностями залегания коренных пород, представленных в основном карбонатными и терригенно-карбонатными формациями кембрия, в конечном итоге определяют наличие и развитие современных геологических процессов по трассе нефтепровода.
- В результате исследования территории трассы нефтепровода следует отметить наличие следующих геологических процессов: карст, термокарст, наледеобразование, заболачивание, эрозия, сезонное пучение грунтов. В целом инженерно-геологические условия трассы трубопровода достаточно сложные, в связи с наличием на большой площади многолетнемерзлого грунта, и карстовые процессы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варламов С., Скрябин П. Инженерно-геокриологическое состояние коридоров трасс трубопроводов центральной Якутии // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Отв. ред. В.Ю. Фридловский. – Якутск, 8–10 апреля 2020. – Якутск: ИД СВФУ, 2020. – С. 430–433.
- Трифонов О.В., Силкин В.М., Черний В.П. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода «Сила Сибири» на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей // Вестн. газовой науки. – 2020. – № 2 (44). – С. 34–50.
- Трифонов О.В., Морин И.Ю., Володин П.А. Принципы классификации участков по прогнозируемой опасности для магистральных газопроводов, расположенных в зонах развития опасных инженерно-геокриологических процессов // Наука и техника в газовой промышленности. – 2021. – № 2. – С. 82–98.
- Hoopes O., Croft P., Wutting F. Embankment fill slope movement on thaw sensitive permafrost: combining creep testing and thermal simulations to develop mitigation options at lost creek along the Trans-Alaska pipeline system; Lost Creek. P. 2 // Permafrost 2021: Merging Permafrost Science and Cold Regions Engineering. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021. – С. 360–373.
- Investigation of permafrost engineering geological environment with electrical resistivity tomography: A case study along the China-Russia crude oil pipelines / X. Li, X. Jin, X. Wang, H. Jin, L. Tang, X. Li, R. He, Y. Li, C. Huang, S. Zhang // Engineering Geology. – 2021. – V. 291. – № 106237 URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106237> (дата обращения 01.06.2022).

- В настоящей работе проведен комплекс обработки проектных данных, продольных разрезов профиля трубопровода, а также фактического материала по трассе нефтепровода с целью определения фактического наличия и протяженности проявлений опасных геологических процессов по трассе трубопровода. Проведена их идентификация и привязка к трассе нефтепровода.
- Предлагаемая в данной работе методика определения удельного веса воздействия опасных геологических процессов, находящая риск возникновения деформаций трубопровода, является достаточно быстрым в реализации способом для установления наиболее опасных участков. Установлено, что наибольшую угрозу для трубопровода представляют процессы, связанные с изменением многолетнемерзлого грунта, и карстовые процессы.

Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).

стральных газопроводов, расположенных в зонах развития опасных инженерно-геокриологических процессов // Наука и техника в газовой промышленности. – 2021. – № 2. – С. 82–98.

- Investigation of permafrost engineering geological environment with electrical resistivity tomography: A case study along the China-Russia crude oil pipelines / X. Li, X. Jin, X. Wang, H. Jin, L. Tang, X. Li, R. He, Y. Li, C. Huang, S. Zhang // Engineering Geology. – 2021. – V. 291. – № 106237 URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106237> (дата обращения 01.06.2022).

6. Казанцева Л.А., Воробьева С.В. Мониторинг геокриологических условий природных ландшафтов на трассе газопровода Надым-Пунга // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. – 2020. – № 1. – С. 29–35.
7. Реутских Н. В., Бережной М. А., Дуденко И. А. Геотехнический мониторинг для магистральных трубопроводов в различных типах многолетнемерзлых пород // Научный журнал Российской газового общества. – 2016. – № 2. – С. 22–26.
8. Strokova L.A. Recognition of geological processes in permafrost conditions // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 8. – P. 5517–5530. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4> (дата обращения 01.06.2022).
9. Фи Х. Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности из-за извлечения подземных вод // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.
10. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
11. Строкова Л.А., Ежкова А.В., Леонова А.В. Применение линейного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 117–126.
12. Строкова Л.А., Галеева Э.И., Леонова А.В. Районирование инженерно-геокриологических условий трассы трубопровода на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 14–22.
13. Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю. Типизация инженерно-геологических условий территории трассы проектируемой железной дороги Элегест–Кызыл Курагино // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 64–77.
14. Мележ Т.А. Типологическое районирование трасс магистральных трубопроводов по возможности проявления инженерно-геологических процессов (на примере трассы магистрального трубопровода «Дружба 2» в пределах Республики Беларусь) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 10–16.
15. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil // Engineering Geology. – 2018. – V. 246. – P. 107–122.
16. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures / N. Gredas, V. Marinos, G. Papathanassiou, A. Ganas, S. Valkaniotis // Environmental Earth Sciences. – 2018. – V. 77. – № 12. – P. 425. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7598-9> (дата обращения 01.06.2022).
17. Hassanpour J., Firouzei Y., Hajipour G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 1. – P. 267–280.
18. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742.
19. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field / Z. Li, W. Shi, P. Lu, Q. Wang, Z. Miao // Journal Remote Sensing of Environment. – 2016. – V. 187. – P. 76–90.
20. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas», (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // Geosciences. – 2013. – V. 1. – P. 46–62.
21. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping / T. Gudiyangada Nachappa, S. Kienberger, S.R. Meena, D. Hölbling, T. Blaschke // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 572–600.
22. Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran) / S. Sharafi, H. Kamangir, S.A. King, R. Safaierad // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14. – № 12. – P. 1–11.
23. Gebregziabher T., Suryabagavan K.V., Kumar Raghuvanshi T. WebGIS-based decision support system for soil erosion assessment in Legedadi watershed, Oromia Region, Ethiopia // Geology, Ecology, and Landscapes. – 2021. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (дата обращения 11.06.2022).
24. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askaoun watershed, southern Morocco / A. Tairi, A. Elmouden, L. Bouchaou, M. Aboulouafa // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14. – № 9. – P. 1–22.
25. Moses A.N. GIS-RUSLE interphase modelling of soil erosion hazard and estimation of sediment yield for river Nzoia basin in Kenya // J Remote Sens GIS. – 2017. – V. 6. – № 3. – P. 1–13.
26. Pambudi A.S., Moersidik S.S., Karuniasa M. Analysis of recent erosion hazard levels and conservation policy recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed // Jurnal Perencanaan Pembangunan: the Indonesian Journal of Development Planning. – 2021. – V. 5. – № 1. – P. 71–93.
27. Soil erosion modelling using GIS and revised universal soil loss equation approach: a case study of Guna-Tana landscape, Northern Ethiopia / A. Teshome, A. Halefom, M. Teshome, I. Ahmad, Y. Taddele, M. Dananto, P. Szucs // Modeling Earth Systems and Environment. – 2021. – V. 7. – № 1. – P. 125–134.
28. Баборыкин М.Ю. Сходимость результатов дистанционного метода дешифрирования с полевыми работами на линейном объекте. На примере оползневого участка // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 161–175.
29. Елизаров А.С., Курчатова А.Н. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – № 1. – С. 28–42.
30. Технический отчет по инженерным изысканиям. Обустройство нефтяной оторочки ботуобинской залежи Чаяндинского НГКМ с выделением этапа опытно-промышленных работ. Этап 3. Строительство нефтепровода Чаянда-ВСТО. В 5 т. Т. 2.1 (часть 2). – Саратов: ОАО «ВНИПИгаздобыча», 2014. – 412 с.
31. Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (северной Евразии). – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 448 с.

Поступила 23.06.2022 г.

#### Информация об авторах

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

UDC 624.131

## ROLE OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES IN OPERATION OF THE CHAYANDA-ESPO OIL PIPELINE

Lyudmila A. Strokova<sup>1</sup>,  
sla@tpu.ru

Dmitry A. Nechaev<sup>1</sup>,  
nechaevdmitryf@gmail.com

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

**The relevance** of the work is caused by the importance of ensuring the smooth operation of pipeline transport, which determines the energy and economic security of the country. Manifestations of hazardous geological processes can cause pipeline failures, with consequences ranging from injury/death, environmental impact, and property damage, to lengthy service disruption and failure to achieve delivery targets. Pipeline failures resulting from natural hazards are typically rare (but costly) events. That is why it is important to correctly assess the ground conditions and predict their change during the operation of the pipeline.

**This study aims** to identify sections of the route with the probable activation of hazardous geological processes and their impact on the operation of the structure.

**Methods of the research.** This study includes an analysis of the results of engineering surveys on the arrangement of the Chayanda oil and gas condensate field and geotechnical monitoring data along the pipeline route.

**The results.** Description of the engineering and geological conditions of the pipeline route was carried out. The most common dangerous geological processes within the pipeline route are karst, waterlogging, water erosion, as well as manifestations of geocryological processes – thermal erosion, thermokarst, frost heaving, frost cracking, and icing. We identified the areas of manifestation of geological processes along the pipeline route. The processes associated with the change of permafrost soils and karst processes turned out to be the most extensive. We made the assessment of the contribution of the hazardous geological processes in sections between the nodes of the shut-off valves of the pipeline, which will ensure the safety of oil transportation, its regulation by disconnecting the section of the linear part of the pipeline.

**Summary.** The most vulnerable sections of the pipeline route have been identified as possible manifestations of geological hazards.

### Key words:

Oil pipeline, engineering and geological conditions, karst, erosion, icing.

The research was carried out at National Research Tomsk Polytechnic University within the program of National Research Tomsk Polytechnic University competitiveness enhancement (VIU funds).

### REFERENCES

1. Varlamov S., Scriabin P. Inzhenerno-geokriologicheskoe sostoyanie koridorov trass tuboprovodov tsentralnoi Yakutii [Engineering-geocryological state of corridors of pipelines of Central Yakutia]. X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentaiya s mezhunarodnym uchastiem. Geologiya i mineralno-syrevye resursy Severo-Vostoka Rossii [Geology and mineral resources of the North-East of Russia. X All-Russian Scientific conference with international participation]. Yakutsk, 8–10 April 2020. Yakutsk, SVFU Publ., 2020. pp. 430–433.
2. Trifonov O.V., Silkin V.M., Cherniy V.P. Prognozirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya magistralnogo gazoprovoda «Sila Sibiri» na uchastkakh razvitiya opasnykh inzhenerno-geokriologicheskikh protsessov na osnove matematicheskikh modeley [Forecasting of the stress-strain state of the main gas pipeline «Power of Siberia» in the areas of development of hazardous engineering and geocryological processes based on mathematical models]. Scientific-technical collection book, 2020, no. 2, (44), pp. 34–50.
3. Trifonov O.V., Morin I.Yu., Volodin P.A. Printsipy klassifikatsii uchastkov po prognoziruemoy opasnosti dlya magistralnykh gazoprovodov, raspolozhennykh v zonakh razvitiya opasnykh inzhenerno-geokriologicheskikh protsessov [Principles of classification of sites according to the predicted danger for main gas pipelines located in areas of development of hazardous engineering and geocryological processes]. Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti, 2021, no. 2, pp. 82–98.
4. Hoopes O., Croft P., Wutting F. Embankment fill slope movement on thaw sensitive permafrost: combining creep testing and thermal simulations to develop mitigation options at lost creek along the Trans-Alaska pipeline system. Lost Creek. P. 2. *Permafrost 2021: Merging Permafrost Science and Cold Regions Engineering*. Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 2021. pp. 360–373.
5. Li X., Jin X., Wang X., Jin H., Tang L., Li X., He R., Li Y., Huang C., Zhang S. Investigation of permafrost engineering geological environment with electrical resistivity tomography: a case study along the China-Russia crude oil pipelines. *Engineering Geology*, 2021, vol. 291, no. 106237.
6. Kazantseva L.A., Vorobyeva S.V. Monitoring of geocryological conditions of natural landscapes on the route of the Nadym-Punga gas pipeline. *Transport and mechanical engineering of West Siberia*, 2020, no. 1, pp. 29–35. In Rus.
7. Reutskikh N.V., Berezhnoy M.A., Dudenko I.A. Geotechnical monitoring for trunk pipelines in various types of permafrost. *Nauchny zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva*, 2016, no. 2, pp. 22–26. In Rus.
8. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 8, pp. 5517–5530. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4> (accessed 1 June 2022).
9. Phi H.T., Strokova L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.
10. Strokova L.A., Dmitrieva S.A., Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.

11. Strokova L.A., Ezhkova A.V., Leonova A.V. The application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in South Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 117–126. In Rus.
12. Strokova L.A., Galeeva E.I., Leonova A.V. Zoning of engineering-geocryological conditions of the pipelines on Vostochno-Messoyakhskoye field oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 14–22. In Rus.
13. Strokova L.A., Nadezhina Yu.Yu. Typification of engineering and geological conditions of the territory of the route of the projected railway Elegest-Kyzyl-Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 64–77. In Rus.
14. Melezh T.A. Typological zoning of trunk pipeline routes according to the possibilities of engineering-geological processes (on the example of the trunk pipeline «Druzhba 2» within the Limits of the Republic of Belarus). *Izv. Saratov Univ. (N. s.) Ser. Earth Sciences*, 2020, vol. 20, Iss. 1, pp. 10–16. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-1-10-16>
15. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. *Engineering Geology*, 2018, vol. 246, pp. 107–122.
16. Grendas N., Marinos V., Papathanassiou G., Ganias A., Valkaniotis S. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, no. 12, p. 425. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7598-9> (accessed 1 June 2022).
17. Hassanpour J., Firouzei Y., Hajipour G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 1, pp. 267–280.
18. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 723–742.
19. Li Z., Shi W., Lu P., Wang Q., Miao Z. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field. *Journal Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 187, pp. 76–90.
20. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas» (Central Spanish System, Salamanca, Spain). *Geosciences*, 2013, vol. 1, pp. 46–62.
21. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S.R., Höhlbling D., Blaschke T. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 572–600.
22. Sharafi S., Kamangir H., King S.A., Safaierad R. Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 12, pp. 1–11.
23. Gebreegziabher T., Suryabagavan K.V., Kumar Raghuvanshi T. WebGIS-based decision support system for soil erosion assessment in Legedadi watershed, Oromia Region, Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2021, pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (accessed 11 June 2022).
24. Tairi A., Elmouden A., Bouchaou L., Aboulouafa M. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askoun watershed, southern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 1–22.
25. Moses A.N. GIS-RUSLE interphase modelling of soil erosion hazard and estimation of sediment yield for river Nzoia basin in Kenya. *J Remote Sens GIS*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 1–13.
26. Pambudi A.S., Moersdik S.S., Karuniasa M. Analysis of recent erosion hazard levels and conservation policy recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed. *Jurnal Perencanaan Pembangunan: the Indonesian Journal of Development Planning*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 71–93.
27. Teshome A., Halefom A., Teshome M., Ahmad I., Taddele Y., Dananto M., Szucs P. Soil erosion modeling using GIS and revised universal soil loss equation approach: a case study of Guna-Tana landscape, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 125–134.
28. Baborykin M.Yu. Convergence of the results of interpretation remote method with field work on a linear object. On the example of landslide plot. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 161–175. In Rus.
29. Elizarov A.S., Kurchatova A.N. Monitoring of elevated pipelines using global navigation satellite systems. *Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 28–42. In Rus.
30. *Tekhnicheskiy otchet po inzhenernym izyskaniyam. Obustroystvo neftyanoy otorochki botuobinskoy zalezhi Chayandinskogo NGKM s vydeleniem etapa opytno-promyshlennyykh rabot. Etap 3. Stroitelstvo nefteprovoda Chayanda-VSTO* [Technical report on engineering surveys. Arrangement of the oil rim of the Botuobinsk deposit of the Chayandinsky NGCM with the allocation of the stage of pilot industrial works. Stage 3. Construction of the Chayanda-ESPO oil pipeline]. In 5 vol. Vol. 2.1 (part 2). Saratov, VNIPigazdobycha Publ., 2014. 412 p.
31. Milanovsky E.E. *Geologiya Rossii i blizhnego zarubezhya (severnoy Evrazii)* [Geology of Russia and the near abroad (Northern Eurasia)]. Moscow, Moscow State University Publ., 1996. 448 p.

Received: 23 June 2022.

#### Information about the authors

- Lyudmila A. Strokova**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Dmitry A. Nechaev**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.314

## РАВНОВЕСНО-НЕРАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИРОДНЫХ ВОД ТЕРРИТОРИИ ТОРЕЙСКИХ ОЗЕР (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ) С ВЕДУЩИМИ МИНЕРАЛАМИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Дребот Валерия Витальевна<sup>1,2</sup>,

DrebotVV@ipgg.sbras.ru

Лепокурова Олеся Евгеньевна<sup>1,2</sup>,

LepokurovaOY@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 вопросами формирования химического состава подземных вод в природных обстановках, решение которых, в рамках рассматриваемой гипотезы о взаимодействии воды с породами, невозможно без понимания степени равновесия вод с минералами вмещающих пород. Особую специфику этой проблеме придает широкое распространение на территории трещиноватых вулканогенных структур и соленых озер, а также засушливый климат. При этом существующие гипотезы выделяют испарительные процессы как ведущий фактор, приводящий к засолению вод, игнорируя все прочие. Между тем для подземных вод это неочевидно. Общая теория взаимодействия в системе вода–порода может раскрыть механизм формирования вод разного состава, выделить разные этапы соленакопления, включая содовый этап, который нельзя объяснить только процессами испарения. Для этого необходимо провести расчеты степени насыщенности вод относительно минералов вмещающих пород.

**Цель:** оценить равновесно-неравновесное состояние природных вод территории с минералами вмещающих пород на разных этапах эволюционного развития, определить возможный набор вторичных минералов на каждом этапе и выделить необходимые гидрогеохимические параметры для их образования. В дальнейшем результаты будут использоваться для изучения механизмов формирования подземных вод.

**Объекты.** На пути формирования химического состава подземные воды проходят несколько этапов своего развития, среди них: атмосферный (атмосферные воды как источник питания), литогенный (при взаимодействии с вмещающими породами) и испарительный (при взаимодействии с озерными водами, подвергающимися испарению). Чтобы проследить всю эволюцию состава, кроме непосредственно подземных вод верхней динамической зоны (родники, колодцы и скважины глубиной до 70 м, всего 69 проб), также были изучены атмосферные (6 проб), речные (9 проб) и озерные (10 проб) воды.

**Методы.** Макрокомпонентный состав воды определялся современными стандартными методами: титриметрическим, потенциометрическим, фотометрическим, атомно-абсорбционной спектрометрией с пламенной атомизацией и пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией в ИПРЭК СО РАН, микрокомпонентный – методом ICP-MS в ТПУ. Петрографические и минералогические исследования вмещающих пород проводились при помощи растровой электронной микроскопии в ТГУ. Физико-химическое моделирование равновесий в системе вода–порода рассчитывалось с использованием программного комплекса HydroGeo. Затем результаты расчетов сравнивались с натуральными наблюдениями.

**Результаты.** Термодинамические расчеты в системе вода–порода показали, что все природные воды района Торейских озер от атмосферных осадков до соленых озер неравновесны относительно первичных алюмосиликатов (в особенности базальтов, встреченных на севере района исследований), которые они непрерывно растворяют на всем протяжении этого взаимодействия, и равновесны относительно вторичных минералов, которые они формируют (глибсит, каолинит, монтмориллониты, различные карбонаты, хлориты, альбит, микроклин, мусковит и др.). Приведены полученные нами при расчетах основные физико-химические параметры (химический состав, pH и соленость воды), контролирующие образование определенного вторичного минерала.

### Ключевые слова:

Поверхностные и подземные воды верхней динамической зоны, система вода–порода, вторичное минералообразование, формирование химического состава, Торейские озера, Восточное Забайкалье.

### Введение

Формирование химического состава подземных вод – это сложный гидрогеохимический процесс, который учитывает в себе огромное количество всевозможных факторов – от природных условий территории до состава водовмещающих пород [1–4], и даже антропогенного воздействия [5, 6]. Именно поэтому последние десятилетия ученые по всему миру на примерах различных территорий и экспериментальных данных пытаются установить соподчиненность этих факторов, чтобы объяснить образование того

или иного химического состава воды [7–14]. Все это делает изучение процессов формирования состава природных вод важной задачей как фундаментальной, так и прикладной гидрогеохимии. В рамках развивающегося авторами положения о равновесно-неравновесном характере взаимодействия в системе вода–порода, сформулированного С.Л. Шварцевым [15], степень равновесия воды с минералами вмещающих пород является основополагающим фактором этих процессов. Вода в природных условиях, независимо от глубины залегания и скорости движения, все-

гда неравновесна с некоторыми минералами, растворяя их (при участии газов и органического вещества), но одновременно равновесна с другими, которые формируют. Это приводит к изменению химического состава вод и геохимической среды в системе. Такое взаимодействие воды с горными породами является стадийным процессом, каждый этап которого характеризуется определенным составом вод и набором образованных вторичных минералов (или геохимическим типом вод), а также определенной геохимической средой, всё это можно объединить одним термином – гидрогенно-минеральный комплекс [16]. Это положение базируется на известных работах по физико-химическому моделированию и экспериментальным исследованиям Х.К. Хелгесона, Р.М. Гаррелса, Ч.Л. Крайста, Т. Пачеса, И. Тарди, М.Е. Томсона, И.К. Карпова, В.А. Жарикова, С.П. Крайнова, Г.Б. Наумова, Б.П. Рыженко, а также многократно подтверждается расчетами на реальных примерах в многочисленных работах как российских [17–23], так и зарубежных ученых [24–33].

Территория юго-восточного Забайкалья известна прежде всего широким распространением небольших соленых озер различного состава, геохимические особенности формирования которых были детально изучены в работах С.В. Борзенко [22, 34–37]. В то же время наши предыдущие исследования показали [38, 39], что и локально имеющие гидравлическую связь с поверхностными подземные воды территории отличаются не меньшим разнообразием. Здесь, в пределах сравнительно небольшой площади, благодаря засушливому климату, существующим геолого-геоморфологическим условиям, наличию трещиноватых вулканогенных структур, обеспечивающих смешение вод, при непрерывном взаимодействии системы вода–порода сформировались разные типы подземных вод. К тому же интерес представляют широко развитые здесь выходы раннемеловых андезито-базальтов тургинской свиты. Базальты изначально образовывали нашу планету, и как показали последние исследования [40–42], равновесие с ними в принципе невозможно. Поэтому можно считать их начальной точкой эволюции состава вод. Таким образом, территория исследований является уникальным полигоном изучения формирования состава подземных вод в условиях засушливого климата, распространения озер и базальтов.

С целью изучения условий формирования состава подземных вод основными задачами работы было: 1) с помощью физико-химических расчетов выявить степень равновесия природных вод территории Торейских озер с ведущими минералами вмещающих пород (определение индексов насыщения и нанесение результатов на диаграммы равновесий), 2) определить набор вторичных минералов на разных этапах эволюционного развития вод, 3) сравнить полученные результаты с имеющимися данными по составу вмещающих пород, 4) установить необходимые гидрогеохимические параметры (общая минерализация, pH, концентрации ионов) для их образования.

## Фактический материал и методы исследования

В основу работы положены результаты гидрогеохимического опробования на территории Восточного Забайкалья, проведенного совместно сотрудниками Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ТФ ИНГГ СО РАН) и Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук (ИПРЭК СО РАН, г. Чита) в летние периоды с 2017 по 2021 гг. Основным объектом исследований были подземные воды верхней динамической зоны – родники, колодцы и скважины глубиной до 70 м (всего 69 проб). Однако для изучения источников и путей формирования их состава также исследовались поверхностные природные воды территории: атмосферные осадки (6 точек), реки (9 точек), небольшие озера разного состава (10 точек) (рис. 1). Последующие лабораторные исследования макрокомпонентного состава вод были выполнены в аттестованной лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН титриметрическим ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ), потенциометрическим ( $\text{F}^-$ ), фотометрическим ( $\text{Si}$ ,  $\text{P}$ ) методом, а также атомно-абсорбционной спектрометрией с пламенной атомизацией ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) и пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) [38]. Микрокомпонентный состав воды был определен с помощью метода ICP-MS в аккредитованной Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Научно-образовательного центра «Вода» ТПУ. Измерения Eh и pH природных растворов проводились аниономерами CG 837 (Schott), Анион 7000 (Infraspack-Analyte) и комбинированными электродами Platin Elektrod Blu Line 31 RX и ESK 10061 на месте.

Петрографические и минералогические исследования проводились на базе Центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета. Оборудование: поляризационный микроскоп Leica DM750 с возможностью проведения фотосъемки при увеличениях объективов 2,5× (ширина поля зрения 4,52 мм) и 10× (ширина поля зрения 1,12 мм) в скрещенных и параллельных николях. Растворная электронная микроскопия была выполнена на базе аналитического комплекса сканирующего электронного микроскопа «VEGA II LMU», совмещенного с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром модели INCA Energy 350.

Расчеты индексов насыщения (SI) вод относительно минералов были выполнены в программном комплексе физико-химического моделирования HydroGeo [43], базирующегося на методе констант равновесий. Необходимо пояснить, что данный индекс некоторыми авторами называется параметр насыщенности (L), или обратная величина – индекс неравновесности (A), но смысл вкладывают в эти понятия одинаковый. В иностранной литературе используют индекс насыщения, им авторы и будут оперировать. Программа осуществляет расчет на основе данных о химическом составе воды, включая концен-

трации основных ионов, некоторых микрокомпонентов, показателей среды (температуры, pH и Eh раствора) и сведений о наборе минералов, относительно которых планируется определить степень насыщения раствора. Далее результаты моделирования сопоставлялись с натурными наблюдениями, т. е. имеющими данными по составу вмещающих пород.

Обзорная карта района исследований со схемой опробования была подготовлена с помощью программного пакета ArcGIS.

### Объект исследования

Район исследования расположен на юго-востоке Забайкальского края, практически на стыке трех стран: России, Монголии и Китая. В большей степени территория представляет собой водосбор бессточных соленых озёр Зун-Торей и Барун-Торей, крупнейших поверхностных водных объектов региона, однако часть точек опробования, отобранных дальше всего к северу от государственной границы Россия–Монголия, уже выходят за его пределы (рис. 1).



Рис. 1. Обзорная карта района исследований с точками отбора природных вод

Fig. 1. Overview map of the study area with sampling points of natural waters

Речная сеть здесь представлена двумя водосборными бассейнами: региональный Амурский бассейн и местный бассейн стока в Торейские озёра. При этом питают Торейские озера две берущие начало в Монголии реки – Ималка и Ульдза [44]. Рельеф территории преимущественно низкогорный, пологохолмистый и равнинный. Плоские и холмисто-увалистые равнины с пространствами мелкосопочника располагаются на абсолютных отметках от 590 (в районе самих Торейских озер) до 835 м (на северо-востоке территории).

Основной особенностью района исследований является резко-континентальный климат с выраженным чередованием засушливых и влажных периодов, что в прошлом не раз приводило к почти полному пересыханию Тореев [45]. Таким образом, на процесс фор-

мирования химического состава поверхностных вод оказывает влияние испарение, ускоряющее процессы засоления. Для подземных вод решающими факторами являются орографическое положение и геологические условия: локальная трещиноватость вулканогенных структур и понижение абсолютных отметок рельефа по мере приближения к Тореям формирует благоприятную обстановку для формирования вод с высокой соленостью ввиду замедления водообмена по мере приближения от горных обрамлений к озерам [46].

В гидрогеологическом смысле изучаемые воды локализованы в пределах Торейского артезианского бассейна [47], относящегося к монгольскому типу, характеризующегося низкогорным обрамлением, нижнемеловыми и кайнозойскими отложениями чехла и отсутствием стока. В целом на территории в зависимости от типа вмещающих отложений, структуры и возраста горных пород выделяются два основных водоносных комплекса – с пластовым типом скопления и трещинные подземные воды.

Водоносный горизонт рыхлых четвертичных отложений с пластовым типом скопления распространен в аллювию пойм и террас, а также в нижних частях склонов. Эти отложения по данным петрографического анализа представлены песками, галечниками, гравием и супесями. Водовмещающие породы трещинных вод терригенных и терригенно-вулканогенных отложений мела представлены галечниками, валунниками, конгломератами, гравелитами, песчаниками, алевролитами, туфогенными разностями, эфузивами. Выходы последних приурочены к северному берегу озер Зун-Торей и Барун-Торей, а также к территории между ними. Это раннемеловые андезито-базальты тургинской свиты. Пьезометрический уровень исследуемых водоизмещений находился на глубине от 4 до 80 м, а иногда выше поверхности земли [39]. Температура воды изменялась от 2 до 7 °C.

### Химический состав природных вод

Состав, включая микрокомпонентный и изотопный, природных вод территории Торейских озерами уже приводился в работах [38, 48]. Кратко рассмотрим характеристику вод, но уже с учетом отобранных в 2021 г. проб. Последовательность изучения определяется направлением примерной общей эволюции состава вод: атмосферные – речные – подземные – озерные воды. В табл. 1 приведены данные: разброс значений и средние концентрации элементов и параметров.

*Атмосферные осадки* района относятся к ультрапресным (10–120 мг/л), слабокислым (pH 5,0–6,8), сложного катионного и анионного состава водам, но в основном преобладают  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  и  $\text{Na}$ .

*Речные воды* (реки Онон, Борзя, Ульдза) характеризуются соленостью от 0,09 до 0,83 г/л, а значения pH – от 7,3 до 8,2. Химический состав –  $\text{HCO}_3$   $\text{Na}$ – $\text{Ca}$ – $\text{Mg}$ . В целом стоит отметить, что в двух крупнейших питающих Торейские озера реках Ульдза и Ималка самые высокие концентрации ведущих ионов и, соответственно, минерализации, чем в других реках. В некоторых случаях отмечаются повышенные зна-

чения сульфат-иона (реки Урулонгуй и Ульдза) и даже хлор-иона (р. Ималка). При этом содержания кремния в речных водах отличаются неравномерным распределением.

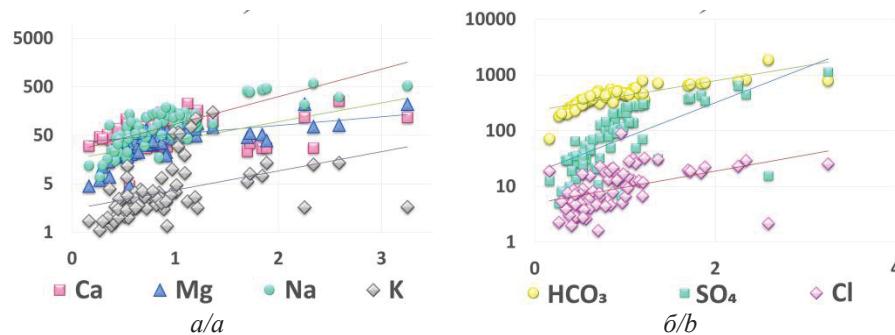
Подземные воды верхней гидродинамической зоны (глубина залегания до 70 м) отличаются большим

разбросом значений pH (от 6,7 до 8,8) и солености (от 0,16 до 3,25 г/л) и очень пестрым катионным составом (рис. 2, a), однако при минерализации более 1,5–2,0 г/л начинает превалировать Na. В анионном составе преобладает ион  $\text{HCO}_3^-$ , но при солености более 1 г/л воды становятся  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^-$  и  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^-$ - $\text{Cl}^-$ .

**Таблица 1. Химический состав природных вод: интервалы значений (в числителе) и среднее (в знаменателе)**

**Table 1. Chemical composition of natural waters: intervals of values (in the numerator) and average (in the denominator)**

Компонент Element	Ед. изм. Units	Атмосферные осадки Precipitation	Реки Rivers	Углекислые подземные воды Carbonic waters	Подземные воды Groundwaters	Озера/Lakes
pH	–	<u>5,0–6,8</u> 6,0	<u>7,3–8,2</u> 7,8	6,2	<u>6,7–8,8</u> 7,9	<u>9,0–10,0</u> 9,4
Eh	мВ	<u>145–250</u> 210	<u>100–208</u> 178	21,0	<u>(–130)–217</u> 87,2	<u>(–69,0)–94,0</u> 39,9
Минерализация Salinity	г/л g/L	<u>0,0–0,1</u> 0,04	<u>0,1–0,8</u> 0,5	2,59	<u>0,2–3,3</u> 0,9	<u>1,1–131</u> 24,2
CO <sub>2</sub>	(мг/л) (mg/L)	<u>&lt;0,4–17,4</u> 10,4	<u>0,2–13,8</u> 6,4	2710	<u>&lt;0,4–70,0</u> 15,8	<0,4
CO <sub>3</sub> <sup>2–</sup>		<u>&lt;0,3</u>	<u>&lt;0,3–2,4</u> 0,5	<0,3	<u>&lt;0,3–36,0</u> 172	<u>6,0–10560</u> 2315
HCO <sub>3</sub> <sup>–</sup>		<u>3,7–22,2</u> 10,9	<u>50,3–456</u> 284	1866	<u>71,0–824</u> 422	<u>522–7320</u> 2446
SO <sub>4</sub> <sup>2–</sup>		<u>1,0–8,9</u> 5,0	<u>4,7–137</u> 53,3	15,6	<u>5,0–1126</u> 132	<u>65,7–17916</u> 3395
Cl <sup>–</sup>		<u>0,9–6,1</u> 3,4	<u>1,8–37,9</u> 9,8	24,3	<u>2,6–526</u> 70,7	<u>131–45650</u> 7044
Ca <sup>2+</sup>		<u>0,4–2,1</u> 1,2	<u>11,3–92,1</u> 53,3	253	<u>4,6–229</u> 61,1	<u>1,6–84,2</u> 14,7
Mg <sup>2+</sup>		<u>0,03–1,5</u> 0,6	<u>2,2–45,9</u> 22,9	81,6	<u>4,5–221</u> 44,4	<u>2,7–85,3</u> 21,9
Na <sup>+</sup>		<u>0,3–85,0</u> 18,1	<u>4,8–58,6</u> 30,9	302	<u>6,9–583</u> 112	<u>260–48729</u> 8737
K <sup>+</sup>		<u>0,3–3,1</u> 1,2	<u>0,7–23,2</u> 4,8	13,5	<u>0,2–149</u> 10,8	<u>3,3–390</u> 100
SiO <sub>2</sub>		<u>0,9–2,6</u> 1,7	<u>0,5–45,9</u> 14,8	32,5	<u>2,0–35,3</u> 16,2	<u>2,3–279</u> 51,2
Fe <sub>общ</sub> /Fe <sub>tot</sub>	(мкг/л) ( $\mu\text{g/L}$ )	<u>0,1–64,1</u> 32,8	<u>14,4–172</u> 62,5	8701	<u>1,9–8701</u> 392	<u>101–198768</u> 28417
Al	<u>6,1–82,2</u> 42,1	<u>2,0–18,7</u> 9,7	85,2	<u>1,8–1580</u> 60,1	<u>41,6–162745</u> 21757	



**Рис. 2. Зависимость катионов (а) и анионов (б) (мг/л, шкала логарифмическая) подземных вод от солености (г/л)**  
**Fig. 2. Dependence of cations (a) and anions (b) (mg / L, logarithmic scale) of groundwater on salinity (g/L)**

Углекислые подземные воды. В ходе опробования было обнаружено одно проявление углекислых вод в скважине на западном берегу оз. Барун-Торей, которое выбивается из общей закономерности благодаря кислой среде (pH=6,2) и повышенной минерализации (3 г/л). По составу воды являются содовыми,  $\text{HCO}_3^-$  (1866 мг/л) и Na (302 мг/л), с повышенными концентрациями Ca (253 мг/л). Содержание свободного  $\text{CO}_2$  в водах – 2710 мг/л, кремния – 15,2 мг/л. Предположительно это Убудукский минеральный источник.

Отмечена общая закономерность для всех подземных вод: с понижением абсолютных отметок рельефа, т. е. большим временем взаимодействия в системе вода–порода, наблюдается рост минерализации (рис. 3, a). Наиболее соленые воды приурочены к южной части территории, в районе устья р. Улдза, а также на водосборе наиболее крупных содовых озер Барун-Торей и Зун-Торей (здесь, возможно, добавляется смешение с озерными водами), а более пресные воды сосредоточены на севере территории (в возвышенных частях).

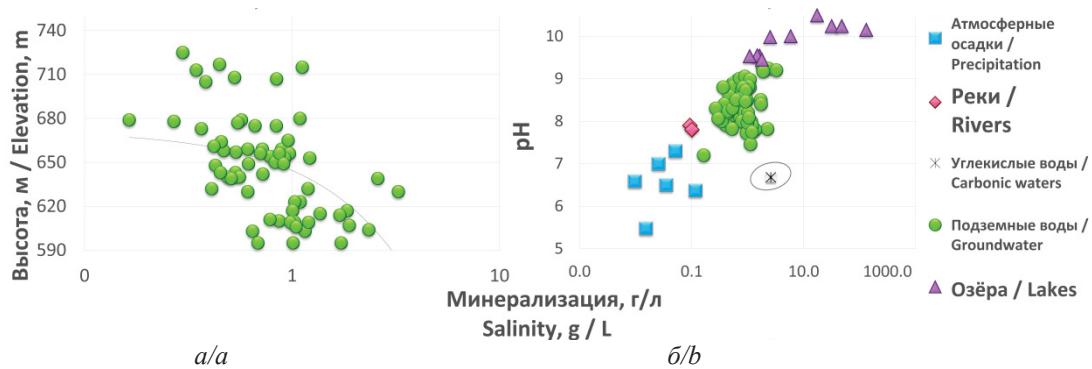


Рис. 3. Общая зависимость между величиной общей минерализации и абсолютными отметками рельефа в месте отбора проб подземной воды (а) и pH всех природных вод (б)

Fig. 3. General relationship between the value of salinity and the absolute relief elevation at the sampling site of groundwater (a) and pH of all natural waters (b)

Озерные воды отличаются еще большим разбросом солености – от 1 до 131 г/л, но достаточно узким диапазоном pH – от 9 до 10. Состав при этом очень разнообразен: анионный варьирует –  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Cl-SO}_4$ ,  $\text{SO}_4\text{-Cl}$ ,  $\text{Cl}$ , в катионном всегда преобладает  $\text{Na}$ .

Таким образом, отличительной особенностью природных вод района являются высокие показатели pH (кроме проявления углекислых вод) и общей минерализации, а также и в целом довольно пестрый химический состав. В направлении атмосферные–речные–подземные–озерные воды увеличиваются соленость (от 10 мг/л до 130 г/л) и значение pH (от 6,7 до 10,0) (рис. 3, б), накапливается Si (до 130 мг/л). По составу сначала превалируют гидрокарбонатные сложного катионного состава воды, затем содовые, далее гидрокарбонатно-сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные-хлоридные натриевые. Также в этом направлении увеличиваются концентрации некоторых микрокомпонентов [48], а концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{K}^+$ , наоборот, снижаются.

#### Результаты расчетов и их обсуждение

При исследовании шлифов, а также по данным растровой электронной микроскопии, минералогический состав вмещающих пород определен следующим образом. Для группы осадочных отложений (алевролиты, песчаники и т. д.) это кварц, плагиоклаз, мусковит, гидрослюдя, присутствуют пироксен, оливин, циркон, из вторичных – гидроокислы железа, кальцит, доломит, хлорит. Для группы эфузивов (базальты, долериты) – плагиоклаз, оливин, клинопироксен (диопсид), диопсид, вулканическое стекло, слюды (серцит, селадонит), магнетит, из вторичных – гидроокислы железа, кальцит, иддингсит (продукт изменения оливина, смесь монтмориллонита и хлорита). Соответственно этот список минералов мы и старались учитывать при моделировании в системе вода–порода.

Рассчитанные по фактическому составу разных водных объектов индексы насыщения (SI) относительно некоторых минералов представлены в табл. 2. С целью сокращения объемов информации показаны только интервалы этих значений. Положительное значение SI указывает на насыщение вод соответ-

ствующим минералом, то есть на возможность формирования этого минерала водами в текущих термодинамических условиях. Отрицательное значение говорит о недонасыщенности вод относительно минерала, а значит, о возможности его непрерывного растворения. При этом воды накапливают составляющие данный минерал элементы.

Ниже для удобства результата термодинамических расчётов представлены графически отдельно для алюмосиликатных (рис. 4) и карбонатных (рис. 5) минералов в форме диаграмм равновесия, построенных на основе методик, разработанных Г.К. Хельгесоном, Р. Гаррелсом, Ч.Л. Крайстом, П.Б. Бартоном и другими [49, 50]. В расчетах при этом использовались величины активностей химических соединений с учетом ионной силы раствора, которая зависит от минерализации вод.

Как показали исследования, все природные воды территории от атмосферных, речных до подземных и озерных неравновесны относительно магматических  $\text{Ca-Mg-Fe}$  алюмосиликатных минералов водовмещающих пород: основных плагиоклазов (аортита), роговых обманок, пироксенов, диопсида, оливина и других. Поля равновесий большинства перечисленных минералов располагаются значительно выше и за пределами представленных на рис. 4 графиков. Атмосферные осадки находятся на стадии формирования гиббсита, речные имеют большой разброс в равновесии с гиббситом, каолинитом, монтмориллонитами, большинство подземных вод равновесны с монтмориллонитами и иллитом, для формирования которого необходимы более высокие значения pH ( $>8$ ), минерализации ( $>1$  г/л) и содержание Si ( $>5$  мг/л). Наиболее минерализованные подземные воды в районе Торейских озер и сами озерные воды уже равновесны относительно хлорита, мусковита и альбита ( $M>2$  г/л и  $\text{pH}>8,5$ ). Углекислые подземные воды из-за высокой концентрации кремния пересыщены относительно всех монтмориллонитов и даже микроклина, а также близки к равновесию с аморфным кремнезётом. Самые соленые и щелочные озерные воды ( $M>5$  г/л и  $\text{pH}>9,5$ ) дополнительно равновесны к анальциму и ломониту (водные цеолиты натрия и кальция).

Относительно карбонатных пород неравновесны все атмосферные осадки, речные воды и незначительная часть пресных подземных вод (рис. 5). Но уже при солености воды не ниже 0,4 г/л,  $\text{pH} > 7,5$  (рис. 6), содержания  $\text{HCO}_3^- > 0,3$  г/л и  $\text{Ca}^{2+} > 5$  мг/л, достигается равновесие кальциту, что характерно для большей части подземных и озерных вод. При этом отмечается, что таких же значений pH, а также концентраций кальция с магнием достаточно для достижения водой насыщения доломитом, в то время как для формирования магнезита в текущих условиях необходимы уже более высокие показатели  $\text{pH} > 8$ , солёности  $> 0,6$  г/л, а также содержания  $\text{HCO}_3^- > 0,6$  г/л и магния  $> 5$  мг/л. При условии, что содержание железа в воде  $> 0,01$  мг/л и  $\text{pH} > 8$ , достигается равновесие с сидеритом. Углекислые воды достигают насыщения по отношению к части карбонатов при достаточно низком значении

pH за счет высоких концентраций кальция и железа и в целом высокой минерализации вод.

Таким образом, состав того или иного вторичного минерала контролируется определенным химическим составом, pH и соленостью вод. А это значит, что между этими параметрами и минеральными новообразованиями существует парагенетическая связь [39]. В табл. 3 приведены основные физико-химические параметры, контролирующие образования определенного вторичного минерала, полученные нами при расчетах. Однако стоит учесть, что это средние показатели, работающие в комплексе. Например, необходимые условия для установления равновесия с кальцитом ( $\text{pH} > 7,5$  и  $\text{M} > 0,4$  г/л, табл. 3) меняются в случае с углекислыми водами, где равновесие наступает уже при  $\text{pH} = 6,2$ , но при этом минерализация вод равна 3 г/л.

**Таблица 2.** Значение индексов насыщения ( $SI$ ) природных вод района Торейских озер к минералам (интервалы значений)  
**Table 2.** Value of saturation indices ( $SI$ ) of natural waters in the Torey lakes region for minerals (ranges of values)

Минерал/Mineral	Формула Formula	Атмосферные осадки Precipitation	Реки Rivers	Углекислые воды Carbonic water	Подземные воды Groundwaters	Озера Lakes
Оксиды/Oxides						
кварц аморф. quartz amorph.	$\text{SiO}_2$ аморф. $\text{SiO}_2$ amorph.	-4,8...-3,8	-5,4...-0,9	-1,3	-5,3...-1,2	-6,9...-3,1
кварц/quartz	$\text{SiO}_2$	-1,9...-0,9	-2,4...2,0	1,7	-2,3...1,8	-3,9...0,1
гипсит/gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-6,6...6,9	-9,6...3,0	0,3	-5,2...6,8	-1,9...8,6
гётит/goethite	$(\text{Fe})\text{OOH}$	-23,0...3,7	1,3...14,0	1,1	1,9...15,0	10,0...19,0
Силикаты и алюмосиликаты/Silicates and aluminosilicates						
ферросилит (Mg-Fe пироксен) ferrosilite (Mg-Fe pyroxene)	$\text{FeSiO}_3$	-29,0...-14,0	-13,0...-2,2	-6,0	-10,0...-4,5	-8,1...-2,6
энstatит (Mg-Fe пироксен) enstatite (Mg-Fe pyroxene)	$\text{MgSiO}_3$	-25,0...-15,0	-10,0...-3,0	-12,0	-12,0...-0,7	-5,7...-2,3
диопсид (Ca пироксен) diopside (Ca pyroxene)	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	-45,0...-27,0	-16,0...-1,9	-19,0	-19,0...-1,4	-7,1...-2,8
жадеит (Na пироксен) jadeite (Na pyroxene)	$\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$	-28,0...-11,0	-14,0...-5,8	-6,8	-10,4...-8,9	-3,2...-1,6
оливин/olivine	$\text{MgFeSiO}_4$	-58,0...-38,0	-23,0...-12,0	-24,0	-28,0...-3,0	-16,0...-5,7
паргасит (рог. обманка) pargasite (hornblende)	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}_5\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-190...-120	-69,0...-37,0	-85,0	-76,0...-13,0	-27,0...-10,0
анортит/anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	-47,0...-15,0	-30,0...-11,0	-18,0	-26,0...-2,3	-17,0...-0,5
альбит/albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-7,9...-4,6	-3,9...-1,0	-0,7	-3,4...2,2	-1,0...4,5
микроклин/microcline	$\text{KAIS}_3\text{O}_8$	-6,6...-5,0	-3,7...-0,3	-1,0	-3,9...1,5	-1,4...4,5
мусковит/muscovite	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-3,9...-1,8	-1,8...0,7	-0,6	-2,7...2,4	0,7...2,5
хлорит (Mg)/chlorite (Mg)	$\text{Mg}_{2,25}\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{1,25}\text{O}_5(\text{OH})_4$	-8,2...-4,1	-2,8...0,1	0,7	-4,0...3,2	0,4...2,8
пренит/prehnite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-60,0...-23,0	-22,0...-5,0	-18,0	-20...3,5	-9,8...6,3
Са-монтморилонит Ca-montmorillonite	$\text{Ca}_{0,15}\text{Al}_{1,9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-12,2...-9,4	-9,9...7,0	4,3	-6,1...6,3	-2,7...14,6
Mg-монтморилонит Mg-montmorillonite	$\text{MgAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$	-31,0...-11	-8,2...8,6	3,0	-9,7...18,0	-4,2...11
Na-монтморилонит Na-montmorillonite	$\text{Na}_{0,3}\text{Al}_{1,9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-7,6...-4,1	-5,2...2,9	2,0	-2,9...4,4	-0,6...10,4
K-монтморилонит K-montmorillonite	$\text{K}_{0,3}\text{Al}_{1,9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-22,0...-5,0	-14,0...-1,0	3,8	-20,0...12,0	-3,2...11
иллит/illite	$\text{K}_{0,5}\text{Al}_{2,5}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-3,3...-1,4	-0,5...1,1	0,9	-1,1...3,7	1,6...4,5
каолинит/kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-14,0...-3,0	-14...8,2	5,1	-14,0...15,0	-3,7...10,0
Карбонаты/Carbonates						
кальцит/calcite	$\text{CaCO}_3$	-16,0...-6,8	-2,8...2,5	0,2	-2,7...3,9	-0,7...3,8
доломит/dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	-30,0...-10,0	-4,0...7,6	2,5	-4,1...12,0	2,4...11,0
магнезит/magnesite	$\text{MgCO}_3$	-18,0...-7,3	-4,9...1,3	-1,4	-5,1...4,0	-0,6...3,9
сидерит/siderite	$\text{FeCO}_3$	-26,0...-9,6	-13,0...-1,2	1,1	-6,4...5,0	-8,0...3,6
Сульфаты/Sulphates						
гипс/gypsum	$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$	-13,0...-9,3	-7,6...-3,7	-5,5	-7,4...-2,6	-8,2...-4,8
ангибит/anhydrite	$\text{CaSO}_4$	-13,0...-9,7	-8,1...-4,1	-5,9	-7,8...-3,0	-8,5...-5,2
Хлориды/Chlorides						
галит/halite	$\text{NaCl}$	-25,0...-20,0	-22,0...-17,0	-16,0	-21,0...-7,4	-14,0...-4,0

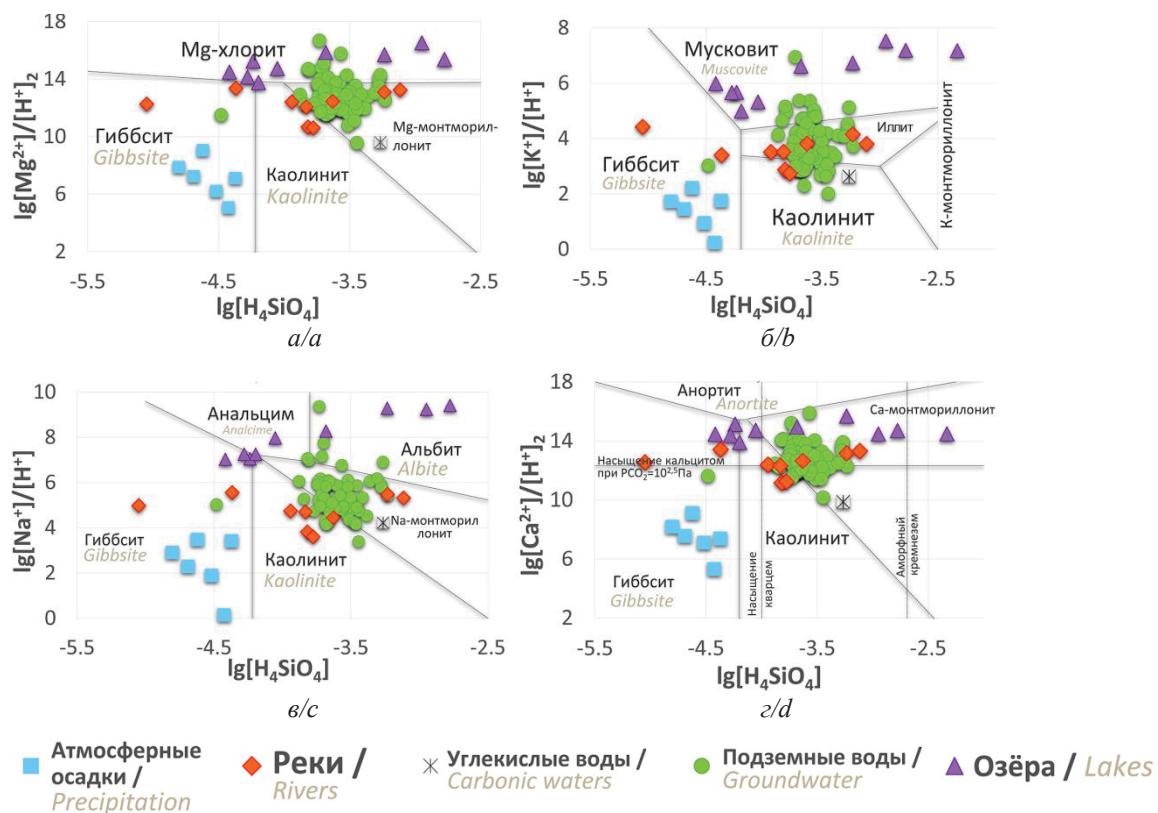


Рис. 4. Диаграммы равновесия основных (а) магниевых, (б) калиевых, (в) натриевых, (г) кальциевых минералов при 25 °C с нанесенными данными по составу природных вод района Торейских озер

Fig. 4. Equilibrium diagrams of the main (a) magnesium, (b) potassium, (c) sodium, (d) calcium minerals at 25 °C with plotted data on the composition of natural waters of the Torey Lakes area

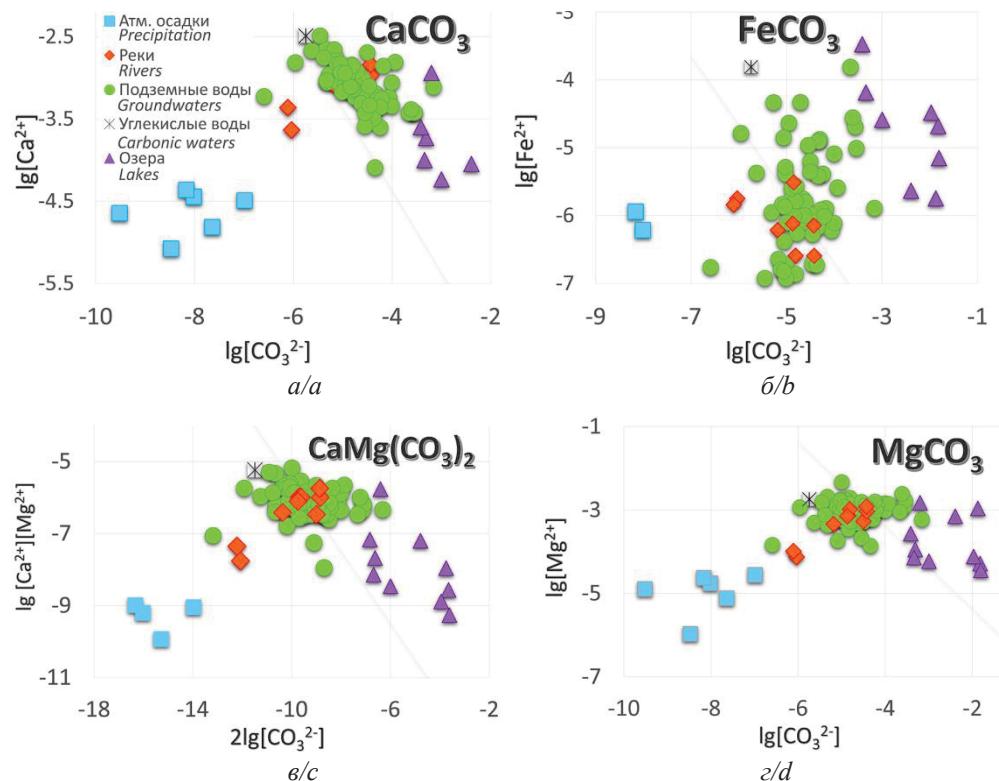


Рис. 5. Равновесие природных вод района с кальцитом (а), сидеритом (б), доломитом (в) и магнезитом (г) при 25 °C и 1 атм

Fig. 5. Equilibrium of natural waters of the region with calcite (a), siderite (b), dolomite (c) and magnesite (d) at 25 °C and 1 atm

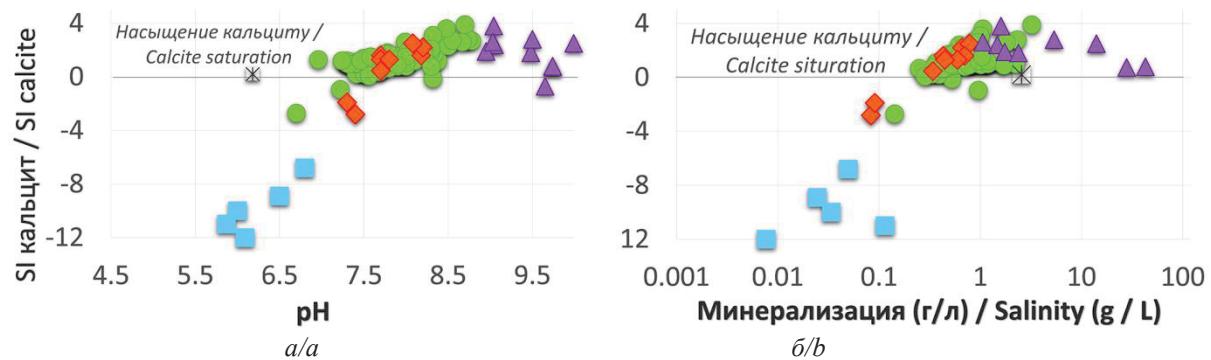


Рис. 6. Зависимости индексов насыщения (SI) вод относительно кальцита от pH (а) и солености (б) вод (усл. обозначения – на рис. 6)

Fig. 6. Dependences of saturation indices (SI) of waters relative to calcite on pH (a) and salinity (b) of waters (see designations in Fig. 6)

**Таблица 3.** Необходимые геохимические параметры вод для достижения равновесия с некоторыми минералами, полученные расчетами

**Table 3.** Necessary geochemical parameters of waters to achieve equilibrium with some minerals, obtained by calculations

Вторичный минерал Secondary mineral	Основные параметры Main parameters
Кальцит/Calcite	pH>7,5; M>0,4 г/л (g/l); HCO <sub>3</sub> >300 мг/л (mg/l); Ca>5 мг/л (mg/l)
Сидерит/Siderite	pH>8,0; M, HCO <sub>3</sub> – неочевидно/unobvious; Fe достаточно 0,01 мг/л Fe – 0,01 mg/L is enough
Доломит/Dolomite	pH>7,5; M, HCO <sub>3</sub> – неочевидно/unobvious; Ca+Mg>5 мг/л (mg/l)
Магнезит/Magnesite	pH>8; M>0,6 г/л (g/l); HCO <sub>3</sub> >400 мг/л (mg/l); Mg>5 мг/л (mg/l)
Са-монтмориллонит Ca-montmorillonite	pH>7,5; M>0,3 г/л (g/l); Ca>15 мг/л (mg/l); Si>4 мг/л (mg/l); Al – неочевидно/unobvious
Na-монтмориллонит Na-montmorillonite	pH>7,5; M>0,3 г/л (g/l); Si>4 мг/л (mg/l); Al, Na – неочевидно/unobvious
Иллит/Illite	M>0,4 г/л (g/l); pH>7,43; K>1,5 мг/л (mg/l); Si, Al – неочевидно/unobvious
Хлорит/Chlorite	M>1,5 г/л (g/l); pH>8,3; Si, Al – неочевидно/unobvious
Мусковит/Muscovite	M>1 г/л (g/l); pH>8,0–8,5; K, Si и Al – неочевидно/unobvious
Микроклин/Microcline	pH>8,5–9,0; M, K, Si, Al – неочевидно/unobvious
Альбит/Albite	pH>8,5–9,0; M>2,0 г/л (g/l); Na>150 мг/л (mg/l); Si, Al – неочевидно/unobvious

\*M – минерализация (мг/л)/salinity (mg/L).

Таким образом, проведенные термодинамические расчеты по вторичному минералообразованию подтверждаются результатами минерало-петрографических исследований пород. Как правило, группа эфузивов (в нашем случае чаще представлены базальтами) характеризуется большой степенью изменчивости и, соответственно, большим набором вторичных минералов, в отличие от сланцев. Все это хорошо согласуется с развиваемой авторами теорией [15, 40, 41, 51, 52], со-

гласно которой на любом этапе эволюции воды остаются неравновесными относительно минералов основных алюмосиликатных пород, в то время как равновесие с кислыми возможно. Так, было показано, что в качестве вторичных на территории в основном среди минералов группы силикатов формируются монтмориллониты, каолиниты, иллиты, биотиты, мусковиты и хлориты, среди карбонатных – кальциты, сидериты, доломиты, при этом среди всех исследованных образцов проявлений магнезита, к которому расчеты показали равновесие с исследуемыми природными водами, обнаружено не было. На рис. 7 представлены фото с карбонизацией (а) и хлоритизацией (б/б) пород.

Таким образом, на начальном этапе ультрапресные воды (атмосферные, речные) интенсивно растворяют минералы вмещающих пород (песчанки, базальты), т. е. в данном случае плагиоклазы, кварц, оливин, пироксен, слюды и другие, при этом сами обогащаются химическими элементами (соленость и pH растут) и образуют первые вторичные минералы – гидроокислы железа, гиббсит, каолинит. Проникая в породы, уже подземные воды остаются неравновесными относительно исходных минералов, кроме кварца, равновесие к которому быстро достигается. Значения минерализации и pH вод продолжают расти, состав HCO<sub>3</sub>-Ca, иногда HCO<sub>3</sub>-Ca-Mg, в наборе вторичных минералов появляются различные монтмориллониты и гидрослюдя (рис. 4). Однако при достижении равновесия относительно карбонатов (рис. 5), которые уводят из воды Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>, формируется HCO<sub>3</sub>-Na (содовый) тип подземных вод, характеризуемый как более щелочной и соленый. Кроме карбонатов, из вторичных в дальнейшем появляются хлорит и его разновидности: иддингит и боулингит (смеси монтмориллонита и хлорита), реже ломонтит (цеолит), пренит, альбит, селадонит (мусковит) и санидин (КПШ), т. е. на более поздних этапах эволюции системы вода–порода достигается равновесие к K-Na минералам (альбит, мусковит, КПШ), но равновесие к Ca-Mg-Fe алюмосиликатным минералам так и не достигается, что обеспечивает постоянную эволюцию состава вод и вторичных отложений.

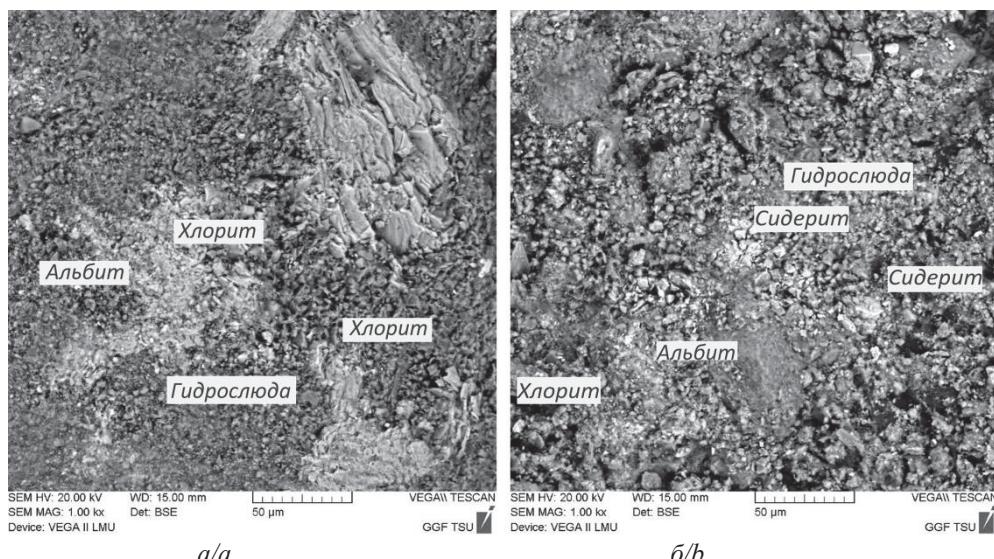


Рис. 7. Снимки свежего скола образца, выполненные на растровом электронном микроскопе

Fig. 7. SEM images of fresh cleaved rock sample

### Выводы

Исследования показали, что на территории Торейских озер в условиях засушливого климата и широкого распространения эффузивных пород и соленых озер формируются разнообразные по составу подземные воды. Их отличительной особенностью являются высокие показатели pH – до 8,8 (кроме проявления углекислых вод) и общей минерализации – до 3,3 г/л. По составу среди вод северной части района исследований (за пределами водосбора Торейских озёр) сначала превалируют гидрокарбонатные сложного катионного состава воды, а по мере понижения абсолютных отметок рельефа и приближению к самим Тореям – содовые, далее гидрокарбонатно-сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные-хлоридные натриевые воды. В целом для природных вод территории характерно в направлении атмосферные–речные–подземные–озерные воды увеличение солености, значения pH, концентрации основных ионов, кроме Ca, Mg, K, увеличение концентраций большинства микрокомпонентов.

Проведенные термодинамические расчеты в системе вода–порода позволили получить наиболее полное представление о сложном поведении химических элементов в составе изучаемых подземных вод в районе Торейских озёр. Показано, что система вода–порода носит четко выраженный равновесно–неравновесный характер. При этом подземные воды

района исследований, равновесные с вторичными алюмосиликатными минералами (каолинитом, Ca, Mg-монтмориллонитом, иллитом, кальцитом), всегда остаются неравновесными с эндогенными минералами водовмещающих пород (оливин, паргасит, амфибол, жадеит, аортит и др.). Показано, что результаты комплексных лабораторных исследований водовмещающих пород совпадают с полученными результатами проведенных термодинамических расчетов в системе вода–порода. Во вторичных минералах отмечают среди алюмосиликатов монтмориллониты, каолиниты, иллиты, биотиты, мусковиты и хлориты, среди карбонатов – кальциты, сидериты, доломиты, с которыми вода на литогенном этапе своего формирования постепенно достигает равновесного состояния.

Полученные результаты о степени равновесия подземных вод, отобранных на территории, окружающей Торейские озера на юго-востоке Забайкалья, а также выделенные необходимые геохимические параметры для формирования определенного вторично-го минерала будут положены в основу выделения геохимических типов изучаемых вод.

Авторы выражают благодарность и.о. заведующего лабораторией геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН д.г.-м.н. Светлане Владимировне Борзенко за помощь в организации полевых исследований и научные консультации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90040.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu B.Q., Ren X.Z., Rioual P. Geological control on the origin of fresh groundwater in the Otindag Desert, China // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 103. – P. 131–142.
2. Origin of the Crescent Moon Spring in the Gobi Desert of northwestern China, based on understanding groundwater recharge / Ch. Su, Ya. Wang, Sh. Ge, Zh. Li, J. Li // Journal of Hydrology. – 2020. – V. 580. – P. 1–13.
3. Herczeg A.L., Dogramaci S.S., Leaney F.W.J. Origin of dissolved salts in a large, semi-arid groundwater system: Murray Basin, Australia // Marine and Freshwater Research. – 2001. – V. 52. – P. 41–52.
4. Multi-tracer approach for assessing complex aquifer systems under arid climate: case study of the River Tata catchment in the Moroccan Anti-Atlas Mountains / L. Heiß, Lh. Bouchaou, S. Tadoumant, B. Reichert // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 120. – 104671.
5. Влияние антропогенных факторов на водные экосистемы / П.Я. Пукало, А.В. Базаева, А.В. Беспалый, М.А. Панчинский // Животноводство и ветеринарная медицина. – 2020. – Т. 3. – № 38. – С. 33–36.
6. Geochemical and isotope evidence for groundwater mineralization in a semi-arid river basin, Sri Lanka / S. Senarathne,

- J. Jayawardana, E. Edirisinghe, R. Chandrajith // *Applied Geochemistry*. – 2021. – V. 124. – P. 1–10.
7. Формирование химического состава подземных солоноватых и рассоловых вод Тувинского прогиба и его обрамления / Н.В. Гусева, Ю.Г. Копылова, Ч.К. Ойдуп, К.Д. Аракчаа, К.М. Рычкова, А.А. Хващевская, О.Д. Аюнова // *Геология и геофизика*. – 2018. – Т. 59. – № 2. – С. 172–182.
8. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины / С.Х. Павлов, К.В. Чудненко, В.А. Голубев, А.И. Оргильянов, П.С. Бадминов, И.Г. Крюкова // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2018. – Т. 9. – № 1. – С. 221–248.
9. Формирование химического состава поверхностных вод в Арктике на примере озера Инари и реки Паз / С.И. Мазухина, В.А. Маслобоев, С.С. Сандимиров, В.И. Пожиленко, С.В. Иванов // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. – 2017. – Т. 20. – № 1/2. – С. 252–260.
10. О влиянии почв на формирование химического состава грунтовых вод в пределах Республики Татарстан / Р.Х. Мусин, А.Р. Галиева, Т.Г. Кудбанов, З.Г. Калкаманова, Н.А. Курлянов // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2020. – Т. 1. – № 1. – С. 90–99.
11. Geochemical mechanisms controlling the isotopic and chemical composition of groundwater and surface water in a sector of the Pampean plain (Argentina) / G. Borzi, C. Tanjal, L. Santucci, E. Carol // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. – 683. – C. 455–469.
12. Hydrochemical and isotopic assessment for characterizing groundwater quality and recharge processes under a semi arid area: case of the Haouz plain aquifer (Central Morocco) / S. Kamal, S. Sefiani, N.E. Laftouhi, A. El Mandour, J. Moustadraf, M. Elgettafi, M. Himi, A. Casas // *Journal of African Earth Sciences*. – 2021. – V. 174. – P. 1–17.
13. Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir delta, Sinai, Egypt / M.A. Eissa, J.M. Thomas, G. Pohll, O. Shouakar-Stash, R.L. Hershey, M. Dawoud // *Applied Geochemistry*. – 2016. – V. 71. – P. 48–62.
14. Hydrogeochemical surveys of shallow coastal aquifers: a conceptual model to set-up a monitoring network and increase the resilience of a strategic groundwater system to climate change and anthropogenic pressure / B. Nisia, O. Vasellia, M. Taussic, M. Doverid, M. Menichinid, J. Cabassia, B. Racod, S. Botteghid, M. Mussid, G. Masetti // *Applied Geochemistry*. – 2022. – V. 142. – P. 105350.
15. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: в 5 т. Т. 2: Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
16. Шварцев С.Л. Фундаментальные механизмы взаимодействия в системе вода–горная порода и ее внутренняя геологическая эволюция // *Литология*. – 2008. – № 6. – С. 3–24.
17. Равновесие азотных терм Байкальской рифтовой зоны с минералами водовмещающих пород как основа для выявления механизмов их формирования / С.Л. Шварцев, Л.В. Замана, А.М. Плюснин, О.Г. Токаренко // *Геохимия*. – 2015. – Т. 2015. – № 8. – С. 720–733.
18. Гидрогоеохимические особенности термальных вод Южного Трангбо (Центральный Вьетнам) / Д.А. Новиков, В.Т. Doan, Т.К.В. Phan, Н.А. Харитонова // *Тихоокеанская геология*. – 2018. – Т. 37. – № 1. – С. 77–93.
19. Гусева Н.В., Воробьёва Д.А., Евтигина З.А. Особенности взаимодействия в системе вода–порода на территории водосбора озера Имандра (Кольский полуостров) // *Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 177–188.
20. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 116. – 104579.
21. Шварцев С.Л., Зиппа Е.В., Борзенко С.В. Природа низкой солености и особенности состава термальных вод провинции Цзянси (Китай) // *Геология и геофизика*. – 2020. – V. 61. – № 2. – С. 243–262.
22. Борзенко С.В. Основные условия формирования химического состава вод соленых и солоноватых озер восточного Забайкалья // *Геохимия*. – 2020. – Т. 65. – № 12. – С. 1212–1230.
23. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Trifonov N.S. Equilibrium-non-equilibrium of the brine-kimberlite system in the Udachnaya pipe, Russia, based on physicochemical modeling // *Applied Geochemistry*. – 2022. – V. 138. – 105219.
24. Palandri J.L., Kharaka Y.K. A Compilation of rate parameters of water-mineral interactions kinetics for application to geochemical modeling. USGS-Report (2004-1068). – California: Menlo Park, 2004. – 64 p.
25. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations // US geological survey techniques and methods. – Denver, Colorado, 2013. – B. 6. – Ch. A43. – 497 p.
26. Impact of fluid-rock interaction on water uptake of the Icelandic crust: implications for the hydration of the oceanic crust and the subducted water flux / B.I. Kleine, A. Stefánsson, S.A. Halldórsdóttir, J.D. Barnes // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2020. – V. 538. – 116210.
27. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of surface water and groundwater in the Qinghai Lake catchment (China) / S. Liang, J. Guo, P. Wu, Yu. Feng, Xu. Wang, G. Wang, W. Xu, Yi. Luo, Li Wan // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2020. – V. – 13. – № 3. – P. 1–16.
28. Effects of gypsum-salt rock on mineral transformations in a saline lacustrine basin: Significance to reservoir development / L. Yang, Xi. Lia, Qi. Zhuoc, Zh. Yue, Yu. Yanga, K. Liu // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – V. 211. – 110240.
29. Processes controlling the hydrochemical composition of geothermal fluids in the sandstone and dolostone reservoirs beneath the sedimentary basin in north China / J. Lia, Zh. Wu, Gu. Tianb, Ch. Ruanb, G. Sagoe, X. Wang // *Applied Geochemistry*. – 2022. – V. 138. – 105211.
30. Geochemical evolution of groundwater under the influence of human activities: A case study in the southwest of Poyang Lake Basin / H. Maoa, G. Wang, Fu Liao, Zh. Shua, Xu. Huang, Bo Lia, Xin Yan // *Applied Geochemistry*. – 2022. – V. 140. – 105299.
31. A hydrochemistry and multi-isotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River basin / Ch. Fu, X. Li, J. Ma, L. Liu, Ming Gao, Zh. Bai // *Applied Geochemistry*. – 2018. – V. 98. – P. 82–93.
32. Gysi A.P., Stefansson A. CO<sub>2</sub>-water-basalt interaction. Low temperature experiments and implications for CO<sub>2</sub> sequestration into basalts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2012. – V. 81. – P. 129–152.
33. CO<sub>2</sub> mineral trapping in fractured basalt / W. Xionga, R.K. Wells, A.H. Menefee, P. Skemer, B.R. Ellisc, D.E. Giammar // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2017. – V. 66. – P. 204–217.
34. Borzenko S.V. The main formation processes for different types of salt lakes: Evidence from isotopic composition with case studies of lakes in Transbaikalia, Russia // *Science of the Total Environment*. – 2021. – V. 782. – 146782.
35. Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // *Applied Geochemistry*. – 2019. – V. 103. – P. 72–84.
36. Борзенко С.В., Замана Л.В., Порохов В.Ф. Изотопный состав, природа и основные механизмы формирования разных типов и подтипов соленых озер Забайкалья // *Геология и геофизика*. – 2022. – Т. 63. – № 6. – С. 851–874.
37. Вертикальное распределение биомолекул в карбонатных отложениях и бактериальном мате степного щелочного озера (восточное Забайкалье) / О.В. Серебренникова, С.В. Борзенко, Е.А. Ельчанинова, Е.Б. Стрельникова, И.В. Русских // *Геохимия*. – 2022. – Т. 67. – № 5. – С. 463–481.
38. Лепокурова О.Е., Дрбот В.В. Изотопный состав ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) подземных вод территории Торейских озер (Восточное Забайкалье) // *Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 20–29.
39. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: a case study from south-

- eastern Transbaikal region (Russia) // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 123. – P. 1–16. – 104763.
40. Шварцев С.Л. С чего началась глобальная эволюция? // Вестник РАН. – 2010. – Т. 3. – С. 235–244.
41. Шварцев С.Л. Неизвестные механизмы гранитизации базальтов // Вестник Российской академии наук. – 2016. – Т. 86. – № 12. – С. 1106–1120.
42. Gysi A.P., Stefansson A. Experiments and geochemical modeling of  $\text{CO}_2$  sequestration during hydrothermal basalt alteration // Chemical Geology. – 2012. – V. 306–307. – P. 10–28.
43. Букаты М.Б. Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo. Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) № 50200500605. – М.: ВНТИЦ, 2005. – 7 с.
44. Биосферный заповедник «Даурский» / О.К. Кирилюк, В.Е. Кирилюк, О.А. Горшко, Л.И. Сараева, С.М. Синица, Т.И. Бородина, Е.Э. Ткаченко, В.А. Бриних. – Чита: Экспресс-издательство, 2009. – 104 с.
45. Баженова О.И. Современная динамика озерно-флювиальных систем Онон-Торейской высокой равнины (Южное Забайкалье) // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – Т. 371. – С. 171–177.
46. Содовые воды района Торейских озер Забайкальского края: химический состав подземных и озерных вод / С.В. Борзенко, В.В. Дребот, И.А. Федоров, С.Л. Шварцев // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2018. – С. 434–437.
47. Верхтуров А.Г., Цыганок В.И., Карпов В.И. Гидрогеология Забайкальского края. – Чита: ЗабГУ, 2017. – 239 с.
48. Дребот В.В., Лепокурова О.Е. Оценка подвижности химических элементов в системе базальты – природные воды – вторичные отложения территории Торейских озер (Восточное Забайкалье) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2020. – С. 335–338.
49. Garrels, R.M., Christ C.L. Solutions, minerals and equilibria. – New York: Harper & Row, 1965. – 450 p.
50. Helgeson H. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions I. Thermodynamic relations // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1968. – V. 32. – № 8. – P. 853–877.
51. Шварцев С.Л. Эволюция в неживой материи — природа, механизмы, усложнение, самоорганизация // Вестник РАН. – 2017. – Т. 87. – № 12. – С. 1091–1100.
52. Шварцев С.Л. Основы теории добавочного усложнения в биосфере Земли // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – № 8. – С. 800–810.

Поступила 15.07.2022 г.

#### Информация об авторах

**Лепокурова О.Е.**, д.г.-м. н., директор и ведущий научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Дребот В.В.**, научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; аспирант, инженер-исследователь отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314

## EQUILIBRIUM-NONEQUILIBRIUM STATE OF NATURAL WATERS IN THE AREA OF TOREY LAKES (EASTERN TRANSBAIKALIA) WITH LEADING MINERALS OF HOST ROCKS

Valeria V. Drebota<sup>1,2</sup>,  
DrebotaVV@ipgg.sbras.ru

Olesya E. Lepokurova<sup>1,2</sup>,  
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS,  
4, Academicchesky avenue, Tomsk, 634055, Russia.

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

**The relevance** of the work is related to the issues of the groundwater's chemical composition formation in environmental conditions, the solution of which, within the framework of the considered hypothesis of the interaction of water with rocks, is impossible without understanding the stage of water's equilibrium with minerals of host rocks. This problem is particularly specific due to the wide distribution of fissured volcanogenic structures and salt lakes in the territory, as well as the dry climate. At the same time, existing hypotheses single out evaporation processes as the key factor leading to water salinization, ignoring all others. Meanwhile, this is not obvious for groundwater. The general theory of interaction in the water–rock system can reveal the mechanism of water's different composition formation, distinguish different stages of salt accumulation, including the soda stage, which cannot be explained only by evaporation processes. To do this, it is necessary to calculate the degree of water saturation relative to the minerals of the host rocks.

**The aim** of the research is to assess the equilibrium-nonequilibrium state of the natural waters in the territory with minerals of host rocks at different stages of evolutionary development, to determine the possible set of secondary minerals at each stage and to identify necessary hydrogeochemical parameters for their formation. In the future, the results will be used to study the mechanisms of groundwater formation.

**Objects.** During chemical composition formation, groundwater goes through several stages of its development, among them: atmospheric (atmospheric waters as a source of nutrition), lithogenic (when interacting with host rocks) and evaporative (when interacting with lake waters that undergo evaporation). In order to trace the entire evolution of the composition, in addition to the directly groundwater of the upper dynamic zone (springs, wells and boreholes up to 70 m deep, 69 samples in total), atmospheric (6 samples), river (9 samples) and lake (10 samples) waters were also studied.

**Methods.** Water's macrocomponent composition was determined by modern standard methods: titrimetric, potentiometric, photometric, atomic absorption spectrometry with flame atomization and flame atomic emission spectrometry at the INREC SB RAS (Chita), microcomponent – by the ICP-MS method at TPU (Tomsk). Petrographic and mineralogical studies of host rocks were carried out using scanning electron microscopy at TSU (Tomsk). Physico-chemical modeling of equilibria in the water–rock system was calculated using the Hydro-Geo software package. Then the calculation results were compared with natural observations.

**Results.** Thermodynamic calculations in the water–rock system showed that all natural waters of the Torey Lakes area from atmospheric precipitation to salt lakes are nonequilibrium with respect to primary aluminosilicates (especially basalts, which are found in the north of the study area), which they continuously dissolve throughout this interaction, and are in equilibrium with respect to secondary minerals they form (gibbsite, kaolinite, montmorillonites, various carbonates, chlorites, albite, microcline, muscovite, etc.). The paper introduces the main physicochemical parameters (chemical composition, pH and salinity of water) obtained by the authors in the calculations, which control the formation of a certain secondary mineral.

### Key words:

Surface and underground waters of the upper dynamic zone, water–rock system, secondary mineral formation, formation of chemical composition, Torey lakes, Eastern Transbaikalia.

The authors appreciate Svetlana V. Borzenko, Dr. Sc., acting for the head of the laboratory of geoecology and hydrogeochemistry at the INREC SB RAS, for assistance in field works and scientific advice.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-35-90040.

### REFERENCES

1. Zhu B.Q., Ren X.Z., Rioual P. Geological control on the origin of fresh groundwater in the Otindag Desert, China. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 103, pp. 131–142.
2. Su Ch., Wang Ya., Ge Sh., Li, Li J. Origin of the Crescent Moon Spring in the Gobi Desert of northwestern China, based on understanding groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 580, pp. 1–13.
3. Herczeg A.L., Dogramaci S.S., Leaney F.W.J. Origin of dissolved salts in a large, semi-arid groundwater system: Murray Basin, Australia. *Marine and Freshwater Research*, 2001, vol. 52, pp. 41–52.
4. Heiß L., Bouchaou Lh., Tadoumant S., Reichert B. Multi-tracer approach for assessing complex aquifer systems under arid climate: case study of the River Tata catchment in the Moroccan Anti-Atlas Mountains. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 120, 104671.
5. Pukalo P.Ia., Bazaeva A.V., Bespalyi A.V., Panchishnyi M.A. The influence of anthropogenic factors on water ecosystems. *Animal agriculture and veterinary medicine*, 2020, vol. 3, no. 38, pp. 33–36. In Rus.
6. Senaratne S., Jayawardana J., Edirisinghe E., Chandrajith R. Geochemical and isotope evidence for groundwater mineralization in a semi-arid river basin, Sri Lanka. *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, pp. 1–10.

7. Guseva N.V., Kopylova Y.G., Khvashchevskaya A.A., Oidup C.K., Rychkova K.M., Ayunova O.D., Arakchaa K.D. Formation of the chemical composition of brackish and brine groundwater in the Tuva depression and surrounding areas. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 2, pp. 135–143. In Rus.
8. Pavlov S.Kh., Chudnenko K.V., Golubev V.A., Orgilyanov A.I., Badminov P.S., Kryukova I.G. Geological factors and physicochemical processes of groundwater formation in the Tunka depression. *Geodynamics and Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 221–248. In Rus.
9. Mazukhina S.I., Maslобоев V.A., Sandimirov S.S., Pozhilenco V.I., Ivanov S.V. Forming chemical composition of surface waters in the Arctic. Case study of lake Inari and the river Paz. *Vestnik MSTU. Scientific journal of Murmansk state technical university*, 2017, vol. 20, no. 1/2, pp. 252–260. In Rus.
10. Musin R.KH., Galieva A.R., Kudbanov T.G., Kalkamanova Z.G., Kurlyanov N.A. soil influence on the chemical composition of ground waters in the republic of Tatarstan. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2020, vol. 1, no. 1, pp. 90–99. In Rus.
11. Borzi G., Tanjal C., Santucci L., Carol E. Geochemical mechanisms controlling the isotopic and chemical composition of groundwater and surface water in a sector of the Pampean plain (Argentina). *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 683, pp. 455–469.
12. Kamal S., Sefiani S., Laftouhi N.E., El Mandour A., Moustadraf J., Elgettafi M., Himi M., Casas A. Hydrochemical and isotopic assessment for characterizing groundwater quality and recharge processes under a semi arid area: Case of the Haouz plain aquifer (Central Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 174, pp. 1–17.
13. Eissa M.A., Thomas J.M., Pohll G., Shouakar-Stash O., Hershey R.L., Dawoud M. Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir delta, Sinai, Egypt. *Applied Geochemistry*, 2016, vol. 71, pp. 48–62.
14. Nisia B., Vasellia O., Taussic M., Doverid M., Menichini M., Cabassia J., Racod B., Botteghid S., Mussid M., Masetti G. Hydrogeochemical surveys of shallow coastal aquifers: A conceptual model to set-up a monitoring network and increase the resilience of a strategic groundwater system to climate change and anthropogenic pressure. *Applied Geochemistry*, 2022, vol. 142, 105350.
15. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondrateva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda: v 5 tomakh. T. 2: Sistema voda-poroda v usloviyakh zony giperogeneza* [Geological evolution and self-organization of water-rock system: 5 v. Vol. 2: Water–rock system in the conditions of a hypergenesis zone]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007. 389 p.
16. Shvartsev S.L. Fundamental mechanisms of interaction in the water–rock system and its interior geological evolution. *Lithosphere*, 2008, no. 6, pp. 3–24. In Rus.
17. Shvartsev S.L., Zamana L.V., Plyusnin A.M., Tokarenko O.G. Equilibrium of nitrogen-rich spring waters of the Baikal rift zone with host rock minerals as a basis for determining mechanisms of their formation. *Geochemistry International*, 2015, vol. 53, no. 8, pp. 713–725.
18. Novikov D.A., Van Tuyen D., Phan T.K.V., Kharitonova N.A. Hydrogeochemical features of thermal waters of South Trungbo (Central Vietnam). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 63–79.
19. Guseva N.V., Vorobeva D.A., Evtyugina Z.A. Features of interaction in the water–rock system: a case study of the Imandra lake catchment (The Kola peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 177–188. In Rus.
20. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, 104579.
21. Shvartsev S.L., Zippa E.V., Borzenko S.V. The nature of low salinity and composition peculiarities of thermal waters in Jiangxi province (China). *Russian Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61, no. 2, pp. 196–213.
22. Borzenko S.V. Principal parameters controlling water composition in saline and brackish lakes in eastern Transbaikalia. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 12, pp. 1356–1373.
23. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Trifonov N.S. Equilibrium-non-equilibrium of the brine-kimberlite system in the Udachnaya pipe, Russia, based on physicochemical modeling. *Applied Geochemistry*, 2022, vol. 138, 105219.
24. Palandri J.L., Kharaka Y.K. *A compilation of rate parameters of water-mineral interactions kinetics for application to geochemical modeling*. USGS-Report (2004-1068). California, Menlo Park, 2004. 64 p.
25. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *US geological survey techniques and methods*. Denver, Colorado, 2013. B.6, Ch. A43, 497 p.
26. Kleinea B.I., Stefanssona A., Halldórrsonna S.A., Barnes J.D. Impact of fluid–rock interaction on water uptake of the Icelandic crust: Implications for the hydration of the oceanic crust and the subducted water flux. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, vol. 538, 116210.
27. Liang S., Guo J., Wu P., Feng Yu., Wang Xu., Wang G., Xu W., Luo Yi., Wan Li. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of surface water and groundwater in the Qinghai Lake catchment (China). *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 1–16.
28. Yanga L., Lia Xi., Zhuoc Qi., Yu Zh., Yanga Yu., Liu K. Effects of gypsum-salt rock on mineral transformations in a saline lacustrine basin: significance to reservoir development. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 211, 110240.
29. Lia J., Wu Zh., Tianb Gu., Ruanb Ch., Sagoec G., Wang X. Processes controlling the hydrogeochemical composition of geothermal fluids in the sandstone and dolostone reservoirs beneath the sedimentary basin in north China. *Applied Geochemistry*, 2022, vol. 138, 105211.
30. Mao H., Wanga G., Liaod Fu., Shia Zh., Huangc Xu., Lia Bo., Yan Xin. Geochemical evolution of groundwater under the influence of human activities: a case study in the southwest of Poyang Lake Basin. *Applied Geochemistry*, 2022, vol. 140, 105299.
31. Fu Ch., Li X., Ma J., Liu L., Gao Ming., Bai Zh. A hydrochemistry and multi-isotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River basin. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 98, pp. 82–93.
32. Gysi A.P., Stefansson A. CO<sub>2</sub>–water–basalt interaction. Low temperature experiments and implications for CO<sub>2</sub> sequestration into basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, vol. 81, pp. 129–152.
33. Xiong W., Wells R.K., Menefee A.H., Skemer P., Ellisc B.R., Giammar D.E. CO<sub>2</sub> mineral trapping in fractured basalt. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, vol. 66, pp. 204–217.
34. Borzenko S.V. The main formation processes for different types of salt lakes: Evidence from isotopic composition with case studies of lakes in Transbaikalia, Russia. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 782, 146782.
35. Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia). *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 103, pp. 72–84.
36. Borzenko S.V., Zamana L.V., Posokhov V.F. The isotope composition, nature, and main mechanisms of formation of different types and subtypes of salt lakes in Transbaikalia. *Geology and geophysics*, 2022, vol. 63, no. 6, pp. 851–874. In Rus.
37. Serebrennikova O.V., Borzenko S.V., Elchaninova E.A., Strelnikova E.B., Russkikh I.V. Vertical distribution of biomolecules in the carbonate sediments and bacterial mat of steppe alkaline lake, Eastern Transbaikalia. *Geochemistry International*, vol. 60, no. 5, pp. 468–485.
38. Lepokurova O.E., Drebot V.V. Isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) of groundwaters in the area of Torey lakes (eastern Transbaikal region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 20–29. In Rus.
39. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: a case study from south-eastern Transbaikal region (Russia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 123, pp. 1–16, 104763.

40. Shvartsev S.L. Where did global evolution begin? *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 80, no. 2, pp. 173–182.
41. Shvartsev S.L. Unknown mechanisms of granitization of basalts. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 86, vol. 6, pp. 513–526.
42. Gysi A.P., Stefansson A. Experiments and geochemical modeling of CO<sub>2</sub> sequestration during hydrothermal basalt alteration. *Chemical Geology*, 2012, vol. 306–307, pp. 10–28.
43. Bukaty M.B. *Reklamno-tehnicheskoe opisanie programmnogo kompleksa Hydrogeo* [Advertising and technical description of the HydroGeo software package. State number registration of algorithms and programs in the All-Russian Scientific and Technical Information Center (VNTIC) No. 50200500605]. Moscow, VNTIC Publ., 2005. 7 p.
44. Kirilyuk O.K., Kirilyuk V.E., Goroshko O.A., Sarayeva L.I., Sinitsa S.M., Borodina T.I., Tkachenko E.E., Brinikh V.A. *Gosudarstvenny zapovednik «Daursky»* [State nature biosphere reserve «Daursky】. Chita, Express-publishing house, 2008. 104 p.
45. Bazhenova O.I. Current dynamics of fluvio-lacustrine systems of Onon-Torei high plain (southern Transbaikalia). *Tomsk State University Journal*, 2013, vol. 371, pp. 171–177. In Rus.
46. Borzenko S.V., Drebota V.V., Fedorov I.A., Shvartsev S.L. Sodovye vody rayona Toreyskikh ozer Zabaikalskogo kraya: khimichesky sostav podzemnykh i ozernykh vod [Soda waters of the Toreiski lakes of Transbaikalia region: chemical composition of underground and lake water]. *Geologicheskaya evolutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami. Materialy III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [The geological evolution of the water-rock interaction. Proc. of the third all-Russian scientific conference with international participation]. Ulan-Ude, BSC SB RAS Publ., 2018. pp. 434–437.
47. Verkhoturov A.G., Tsyanok V.I., Karpov V.I. *Gidrogeologiya Zabaikalskogo kraya* [Hydrogeology of the Trans-Baikal Territory]. Chita, ZabGU Publ., 2017. 239 p.
48. Drebota V.V., Lepokurova O.E. Otsenka podvizhnosti khimicheskikh elementov v sisteme basalty – prirodnye vody – vtorichnye otlozheniya territorii Toreyskikh ozer (Vostochnoe Zabaikalia) [Assessment of the mobility of chemical elements in the basalt-natural waters-secondary deposits system in the Torey lakes area (Eastern Transbaikalia)]. *Geologicheskaya evolutsiya vzaimodeysviya vody s gornymi porodami. Materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Water-rock interaction: geological evolution. Proc. of the fourth all-Russian scientific conference with international participation]. Ulan-Ude, BSC SB RAS Publ., 2020. pp. 335–338.
49. Garrels R.M., Christ C.L. *Solutions, minerals and equilibria*. New York, Harper & Row, 1965. 450 p.
50. Helgeson H. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions I. Thermodynamic relations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1968, vol. 32, no. 8, pp. 853–877.
51. Shvartsev S.L. Evolution in nonliving matter: nature, mechanisms, complication, and self-organization. *Herald of the Russian academy of sciences*, 2017, vol. 87, no. 6, pp. 518–526.
52. Shvartsev S.L. Foundations of the theory of additional complication in the Earth's biosphere. *Herald of the Russian academy of sciences*, 2019, vol. 89, no. 4, pp. 379–387.

Received: 15 July 2022.

#### Information about the authors

**Olesya E. Lepokurova**, Dr. Sc., a head of laboratory, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Valeriia V. Drebota**, a research associate, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; postgraduate student, research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

## ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ «ВОСТОЧНОГО» СЛЕДА РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Темиржанова Арай Ермековна<sup>1</sup>,  
temirzhanova.aray@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич<sup>2</sup>,  
yazikoveg@tpu.ru

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич<sup>1</sup>,  
mukhamediyarov@nnc.kz

Сальменбаев Саян Елеусизович<sup>1</sup>,  
salmenbayev@nnc.kz

Умаров Мурат Алпыспаевич<sup>1</sup>,  
Umarov@nnc.kz

Есильканов Гани Мухтарович<sup>1</sup>,  
yessilkanov@nnc.kz

Ташекова Ажар Жумановна<sup>1</sup>,  
Esenzholova@nnc.kz

<sup>1</sup> Национальный ядерный центр Республики Казахстан,  
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 2.

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

**Актуальность** данной работы обусловлена тем, что в зоне воздействия «Восточного» следа радиоактивных выпадений Семипалатинского испытательного полигона не велись работы по оценке содержания химических элементов в компонентах природной среды, включая тяжелые металлы. Параллельное обследование состава твердых частиц аэрозолей воздуха и почвы испытательной площадки «Опытное поле» Семипалатинского испытательного полигона, где проводились наземные и воздушные ядерные испытания, дает наиболее полную картину о возможных источниках поступления химических элементов в компоненты природной среды по «Восточному» следу, а также пути миграции некоторых элементов и радионуклидов в составе воздушных аэрозолей. Обследование территории северо-восточной части полигона, включая населенные пункты по следу прохождения радиоактивных выпадений, представляет особый интерес для безопасного проживания населения, в приоритете которого сельскохозяйственная деятельность.

**Целью** представленной работы является оценка уровней накопления химических элементов в компонентах природной среды в зоне воздействия «Восточного» следа Семипалатинского испытательного полигона.

**Объекты:** почва, твердые частицы аэрозолей воздуха.

**Методы:** анализ проб методами альфа-, бета- и гамма-спектрометрии, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, радиохимии и сканирующей электронной микроскопии; статистическая обработка результатов анализа основных исследуемых компонентов природной среды; оценка динамики пространственного распределения содержания радионуклидов и химических элементов в пробах почвы и твердых частиц аэрозолей воздуха исследуемого участка.

**Результаты.** Изучен химический состав (радионуклидный и элементный) почвенного покрова по профилю «Восточного» следа, а также твердых частиц аэрозолей воздуха размером 2,5 мкм и общих взвешенных частиц, отобранных с участков, расположенных вблизи границ испытательной площадки «Опытное поле» Семипалатинского испытательного полигона. Выявлено пространственное распределение концентраций исследуемых групп химических элементов, радионуклидов в почвенном покрове по «Восточному» следу радиоактивных выпадений. Проведенный корреляционный анализ содержания элементов в пробах воздуха позволил выявить ассоциацию элементов, характерных как для мелких частиц (РМ-2,5), так и для общих взвешенных частиц воздуха испытательной площадки «Опытное поле» СИ Семипалатинского испытательного полигона. Содержание практических всех исследуемых химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха не превышает его допустимые уровни – предельно допустимые концентрации.

### Ключевые слова:

Почва, твердые частицы аэрозолей воздуха, приземный воздух, химические элементы, радионуклиды, ветровой перенос.

### Введение

На территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) расположено несколько испытательных площадок, где проводились разнохарактерные ядерные взрывы, в том числе и площадка «Опытное поле», на которой проводились воздушные и наземные испытания, включающие как ядерные, так и гидро-ядерные взрывы [1, 2]. Наземные и воздушные ядерные испытания, проводившиеся с 1949 по 1962 гг., создали сложную, эволюционирующую во времени радиационную обстановку. Перенос продуктов воздуш-

ных и наземных ядерных взрывов воздушными потоками и их осаждение на поверхности земли образовали широкополосные и протяженные на сотни километров радиоактивные следы [3, 4]. К настоящему моменту на территории СИП выявлены три масштабных следа радиоактивных выпадений – «Южный» след, «Юго-Восточный» след и «Восточный» след (рис. 1). Все три радиоактивных следа были образованы вследствие проведения атмосферных (наземных и воздушных) ядерных испытаний в период с 1949 по 1962 гг. на площадке «Опытное поле» [5]. В результате гидро-

ядерных экспериментов выброшено большое количество альфа-активных радионуклидов, входящих в состав ядерного заряда [6]. «Восточный» след радиоактивных выпадений идентифицирован в результате радиоэкологического обследования прилегающих к СИП территорий в районе населенного пункта Долонь. При этом на территории СИП данный след практически не проявляется или проявляется совсем незначительно, фрагментарно, что, вероятнее всего, связано с неблагоприятными метеорологическими условиями на момент испытания (сильный порывистый ветер, дождь) [7].

элементы литосферы, в том числе радиоактивные изотопы естественного и техногенного происхождения. Твердые частицы аэрозолей, выпадая на земную поверхность, принимают участие в формировании загрязнения почвы [16–34]. Актуальным остается вопрос о проведении исследований по определению содержания химических элементов в составе почвы по «Восточному» следу радиоактивных выпадений СИП для выявления пространственного распределения радионуклидов и тяжелых металлов, а также поступления в составе с твердыми частицами аэрозолей воздуха.

Целью представленной работы является оценка уровней накопления химических элементов в почвенном покрове в зоне воздействия «Восточного» следа Семипалатинского испытательного полигона, а также выявление возможного «привноса» радионуклидов с территории СИП на прилегающие территории по профилю «Восточного» следа.

## Объекты и методы исследования

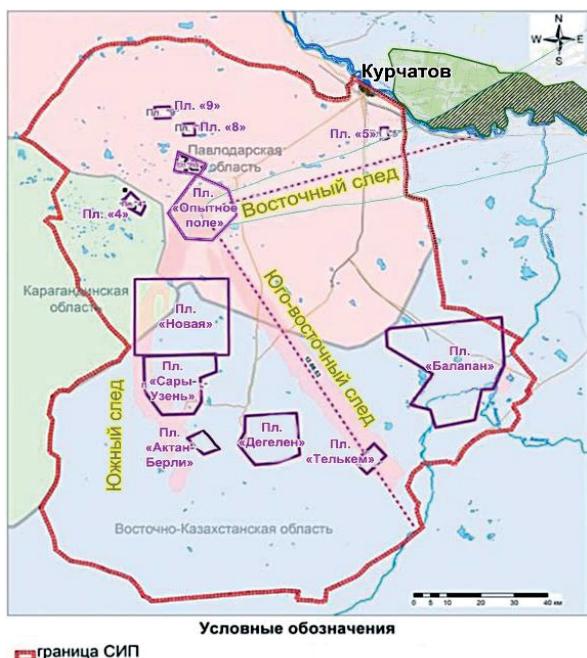
В ходе проведения полевых работ были заложены:

- за пределами испытательной площадки «Опытное поле» СИП четыре исследовательских участка, расположенные на следах радиоактивных выпадений («Восточный», «Юго-Западный», «Южный» след), а также один пост на условно фоновом участке (г. Курчатов) для отбора проб почвы и твердых частиц аэрозолей воздуха (рис. 2);
  - по профилю «Восточного» следа радиоактивных выпадений 14 точек для отбора проб почвы (рис. 2).

Воздух. Отбор проб общих взвешенных частиц аэрозолей воздуха (TSP – Total suspended particles) для элементного анализа проводили в течение 12 часов без перерыва переносным пробоотборником воздуха CF-993B с фиксированной скоростью. Использовали стекловолоконные фильтры (GF/F) диаметром 47 мм, представляющие собой многослойный прессованный волокнистый материал из боросиликатной основы. Фильтры из стекловолокна используются для высокоэффективной фильтрации – они задерживают мелкодисперсные частицы при высокой скорости фильтрации, обладают хорошей емкостью. Объем аспирированного воздуха был не менее 100 м<sup>3</sup>, что является репрезентативным для получения качественных данных.

Для определения радионуклидов в воздухе отбор проб воздушных аэрозолей проводился пробоотборником воздуха Бриз с производительностью 1500 м<sup>3</sup>/ч. на протяжении 24 ч, средний объем прокачанного воздуха составил около 40000 м<sup>3</sup>.

Среднесуточные пробы твердых частиц аэрозолей воздуха (PM-2,5 – Particulate matter – твердые частицы аэрозолей воздуха с диаметром менее 2,5 мкм) отбирали переносным пробоотборником воздуха MVS-6, который оснащен впускным трактом, позволяющим отсекать крупные частицы с размерами более 2,5 мкм, с фиксированной скоростью на заложенных постах мониторинга. Для данного пробоотборника применяли фильтры типа QMA из высокочистых кварцевых



**Рис. 1. Основные следы радиоактивных выпадений СИП [5]**  
**Fig. 1. Main traces of STS radioactive fallout [5]**

На сегодня радионуклидный и элементный состав компонентов природы «Восточного» следа мало изучены. Особый интерес среди них вызывает химический состав почвенного покрова, содержащий различные радионуклиды, тяжелые металлы и токсичные элементы. Очень мало было проведено работ по изучению элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха различных диаметров (2,5 мкм, 10 мкм и более) и почвы испытательной площадки «Опытное поле». Первые исследования распределения радионуклидов в составе различных аэродинамических частиц РМ от 0,1 до  $<10$  мкм СИП проводились в начале 2000-х гг. [8]. Однако более детальное изучение уровней концентрации таких важных загрязнителей воздуха, как РМ2,5 и ТСП, их химического состава в атмосферном воздухе СИП и прилегающих территорий остается в основном неизвестным.

Взвешенные вещества размером менее 10 мкм распространяются на большие расстояния и являются потенциальными загрязнителями основных компонентов природной среды [9–15]. Также эти твердые частицы аэрозолей воздуха содержат практически все

волокон. Пост был расположен на ровном участке ландшафта вдали от строений, леса и других препят-

ствий на высоте 1,5 м от поверхности земли с твердым, не пылящим покрытием.

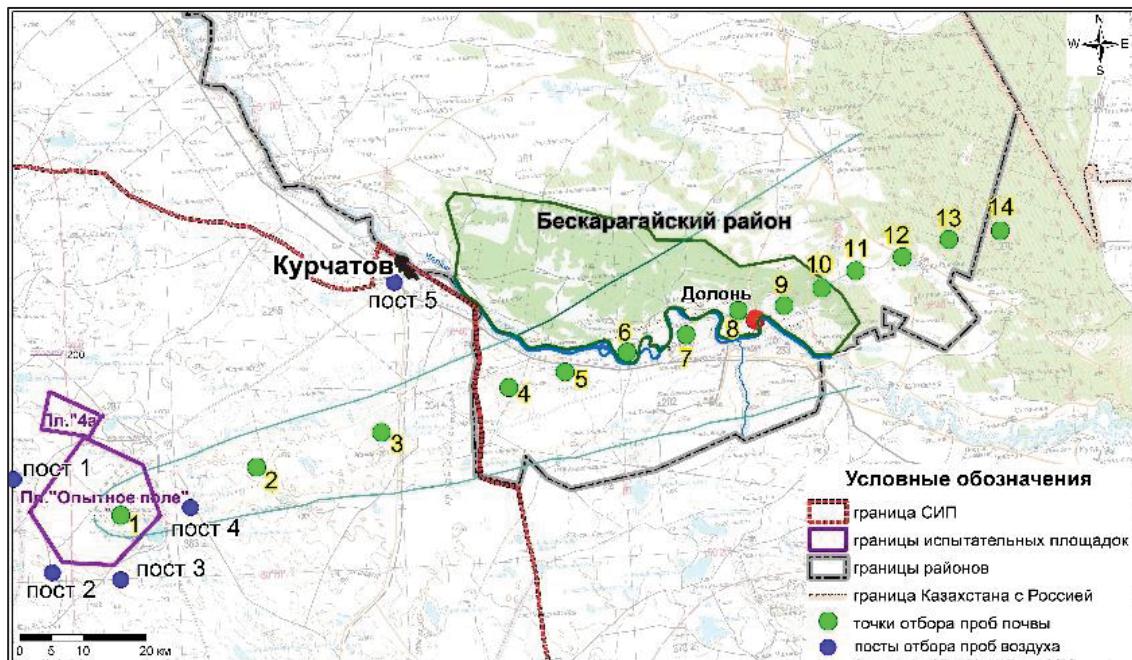


Рис. 2. Контуру «Восточного» следа и точки отбора проб  
 Fig. 2. Contour of the «Vostochny» trace and sampling points

Все пробоотборное оборудование тщательно очищалось при каждой прокачке воздуха. При транспортировке фильтры хранились запечатанными в пластиковых специальных переносных емкостях. В каждой партии фильтров было по 1 неэкспонированному образцу (бланк) для определения фонового содержания веществ в фильтре.

**Почва.** С целью выявления возможного привнесения некоторых химических элементов и радионуклидов с территории СИП на прилегающие территории по профилю «Восточного» следа на протяжение 140 км от источника были отобраны 14 образцов почвы с поверхностного слоя (0–10 см).

Для элементного анализа пробы твердых частиц аэрозолей воздуха (PM-2,5, TSP) и почвы подготовили способом автоклавного разложения, с использованием концентрированных фтористоводородной (HF – hydrofluoric acid), соляной (HCl – hydrochloric acid) и азотной (HNO<sub>3</sub> – nitric acid) кислот. Кислотную минерализацию образцов проводили в герметичных сосудах – автоклавах, при  $t = 160 \pm 5$  °C от 2,5 до 4 часов в зависимости от полноты их разложения (полное растворение кристаллов силикатной матрицы).

Полученные после истирания гомогенные образцы почвы усредняли квартованием до навесок массой 10 г для радиохимического определения изотопов <sup>239+240</sup>Ru и навесок массой 50 г для определения <sup>90</sup>Sr. Для удаления органического вещества подготовленные навески почвы прокаливали в муфельной печи при 550 °C в течение 6 часов.

Радиохимический анализ по определению <sup>239+240</sup>Ru в пробах почвы проводили путем полного кислотного разложения исследуемых образцов почвы и переведе-

ния изотопов плутония в растворенное состояние. Для учета потерь и контроля химического выхода в исследуемые образцы предварительно вносили изотопную метку <sup>242</sup>Ru. Радиохимическое выделение и очистку изотопов плутония проводили с использованием сильноосновного анионита АВ 17·8 в нитратной форме.

Для определения содержания <sup>90</sup>Sr прокаленные навески почвы количественно переносили в химические стаканы и после внесения носителя Sr несколько раз обрабатывали при нагревании 6M раствором HCl с добавлением небольшого количества H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, каждый раз декантируя образующийся после кипячения кислотный выщелат в отдельный химический стакан. Полученный раствор использовали для выделения и очистки изотопов стронция путем последовательного осаждения гидроксидов и карбонатов. Выделенную фракцию стронция выдерживали в течение двух недель для установления радиоактивного равновесия между <sup>90</sup>Sr и его дочерним радионуклидом <sup>90</sup>Y.

В каждой партии воздушных фильтров, предназначенных для отбора проб твердых частиц аэрозолей воздуха, анализировали содержание химических элементов в чистых неэкспонированных образцах. Для проведения контроля качества пробоподготовки, а также анализа образцов почвы применен стандартный образец почвы, зарегистрированный в ГСИ РК с аттестованными значениями содержания элементов. Также для контроля за стадией растворения содержания трудно растворимых химических элементов по методу «введенено–найдено» в соответствии с методикой выполнения измерений НСАМ № 499 «Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и

данных отложений» были использованы обогащенные изотопы Nd, Dy, Yb.

Анализ содержания химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха и почвы проводили методами ИСП-МС с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7700× «Agilent Technologies», а также атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) ICAP 6000 Duo «Thermo Scientific» на базе лаборатории элементного анализа филиала Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан. Для построения градуировочных кривых применялись сертифицированные мультиэлементные стандартные образцы производства компании «Perkin Elmer», «Inorganic Ventures», США. При проведении анализа значения относительного стандартного отклонения (RSD – relative standard deviation) измерений составили менее 10 %. Контроль качества анализа осуществлялся путём измерения контрольного раствора через каждые 10 проб. При неудовлетворительном результате калибровки (отклонение калибровочного графика на 8–10 %) проводили перекалибровку прибора, при которой учитывали новые параметры фона.

Для определения удельной активности естественных и техногенных радионуклидов были применены методы альфа-, бета- и гамма-спектрометрии с использованием спектрометров AlphaAnalyst 7200-12 с PIPS детекторами, Quantulus 1220 с фотоэлектронным умножителем, BE3830 коаксиальным ОЧГ (особо чистый германий) детектором.

Также с применением растровой сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Hitachi S3400N с ЭДС приставкой Bruker XFlash 4010 были изучены более 10 проб воздушных аэрозолей и 5 проб почвы на базе МИНОЦ им. Л.П. Рихванова «Урановая геология» НИ ТПУ с целью определения элементарных частиц изучаемых химических элементов.

Всего на исследовательских участках вблизи границ площадки «Опытное поле» отобрано 13 проб воздушных аэрозолей на определение радионуклидов в воздухе; 13 проб воздушных аэрозолей TSP, 13 проб воздушных аэрозолей PM-2,5 и 4 пробы почвы на определение химических элементов.

### Обсуждение результатов

#### Особенности радионуклидного и элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха

Величины запыленности атмосферного воздуха исследуемых участков сравнены с критериями оценки состояния атмосферного воздуха – ПДК взвешенных частиц – TSP и PM-2,5, выраженных в  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Выявлено, что величина среднесуточной пылевой нагрузки общих взвешенных частиц составляет  $0,02 \text{ мг}/\text{м}^3$ , что ниже величины ПДК  $0,15 \text{ мг}/\text{м}^3$ , а по PM-2,5 –  $0,01 \text{ мг}/\text{м}^3$  (ПДК –  $0,035 \text{ мг}/\text{м}^3$ ) [35]. Преимущественное направление ветра в период отбора проб вблизи границ площадки «Опытное поле» – северо-восточное.

По результатам проведенного гамма-спектрометрического анализа установлено [36], что объемная активность радионуклидов составила: для

$^{40}\text{K}$  – от  $<3,9 \cdot 10^{-6}$  до  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Бк}/\text{м}^3$ ,  $^{232}\text{Th}$  –  $<1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Бк}/\text{м}^3$ ,  $^{226}\text{Ra}$  –  $<8,9 \cdot 10^{-7} \text{ Бк}/\text{м}^3$ , для  $^{137}\text{Cs}$  –  $<5,3 \cdot 10^{-7} \text{ Бк}/\text{м}^3$ ,  $^{241}\text{Am}$  –  $<3,3 \cdot 10^{-7} \text{ Бк}/\text{м}^3$ . Анализ полученных данных показал, что объемная активность  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в воздушной среде не превысила значений допустимых объемных активностей для категории «население» (ДОAnас), установленных Гигиеническими нормативами [37].

В ходе проведения исследований установлено, что на фоновом посту № 5, расположенному на территории г. Курчатов, концентрации большинства исследуемых элементов в составе общих взвешенных частиц (TSP) в 2–15 раз выше, за исключением Cr, Cu, Zn, Cs, Eu и Pb, чем в пробах основных исследовательских участков вблизи границ испытательной площадки «Опытное поле». В составе пыли PM-2,5, отобранной за пределами границ юго-восточной и восточной частей испытательной площадки «Опытное поле», содержание большинства исследуемых элементов показало значение меньше предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения (табл. 1).

**Таблица 1.** Содержание химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха (TSP, PM-2,5) испытательной площадки «Опытное поле» (пост № 1–4) и фонового участка (г. Курчатов, пост № 5),  $\text{нг}/\text{м}^3$  ( $n=26$ )

**Table 1.** Element content in the composition of particulate air aerosols (TSP, PM-2,5) of the test site «Optynnoe pole» and background site (Kurchatov),  $\text{ng}/\text{m}^3$  ( $n=26$ )

Элементы Elements	Посты отбора проб/Sampling posts				
	1	2	3	4	5
Be	1,3 (1,0)*	0,6 (1,9)	0,5 (<0,01)	0,6 (<0,01)	1,9 (1,4)
V	22 (14,0)	11 (0,9)	12 (0,2)	12 (0,4)	30 (19)
Cr	33 (26)	36 (11)	36 (6)	21 (6)	51 (35)
Mn	240 (180)	90 (12)	100 (1,5)	100 (2,8)	370 (290)
Fe	3900 (4100)	1300 (3900)	1400 (310)	1500 (200)	6800 (5900)
Co	6,0 (3,2)	3,2 (1,0)	3,5 (0,1)	5,1 (<0,03)	7,8 (4,4)
Ni	3,9 (1,8)	<0,1 (<0,1)	4,6 (<0,1)	0,9 (<0,1)	8,1 (1,9)
Cu	360 (13)	110 (10)	16 (1,6)	37 (<0,1)	330 (12)
Zn	22000 (50)	22000 (70)	21500 (<25)	24000 (<25)	21000 (<25)
As	1960 (1800)	160 (80)	27 (0,9)	1,2 (<0,5)	270 (230)
Sr	1900 (2200)	690 (320)	580 (30)	730 (<0,1)	4800 (4400)
Mo	52 (6)	30 (12)	9 (<0,5)	22 (<0,5)	47 (9,5)
Cd	3,4 (3,2)	1,9 (<0,1)	1,8 (<0,1)	2,1 (<0,1)	4,9 (3,5)
Cs	11,0 (12)	0,6 (<0,1)	0,6 (<0,1)	0,4 (<0,1)	9,7 (9)
La	23 (27)	8 (54)	8 (<0,02)	10 (<0,02)	60 (55)
Ce	47 (47)	16 (94)	16 (<0,3)	23 (<0,3)	100 (85)
Pr	3,6 (4,0)	1,4 (8,2)	1,5 (<0,05)	2,0 (<0,05)	7,5 (6,8)
Nd	13,7 (16)	6,2 (16)	5,7 (<0,03)	8,6 (<0,03)	26,0 (24)
Sm	2,1 (2,3)	1,6 (4,7)	1,5 (<0,04)	2,0 (<0,04)	3,5 (3,2)
Eu	1,1 (0,8)	11,5 (1,4)	9,7 (<0,03)	11,7 (<0,03)	1,7 (1,1)
Gd	2,5 (2,5)	2,4 (5,2)	2,0 (<0,03)	2,9 (<0,03)	4,3 (3,6)
Pb	56 (46)	15 (5,8)	12 (1,0)	17 (1,1)	35 (17)
Th	2,6 (2,4)	2,2 (1,5)	2,4 (<0,05)	2,7 (<0,05)	6,7 (6,0)
U	9,6 (10)	1,3 (22)	1,3 (<0,05)	1,4 (<0,05)	19,0 (16,0)

Примечание: \* – в скобках содержание элементов в PM-2,5.

Note: \* – in parentheses – element content in PM-2,5.

Пространственное распределение содержания химических элементов в составе TSP, отобранных за пределами границ испытательной площадки «Опытное поле» – северо-восточное.

ное поле», более стабильно относительно характера их распределения в составе более мелких частиц аэрозолей воздуха. При этом следует отметить, что за пределами границы западной части исследуемой площадки и на условно фоновом участке (территория г. Курчатов) накопление содержания большинства химических элементов, включая некоторые редкоземельные элементы, в различных фракциях твердых частиц аэрозолей воздуха происходит одинаково, за исключением некоторых тяжелых металлов. Концентрация V, Co, Ni, Cu, Zn, Mo в составе общей взвеси пыли с западного поста превышает их содержание в составе частиц PM-2,5 от 2 до 100 раз. На обследуемом участке территории г. Курчатов, помимо перечисленных элементов, отмечено превышение содержания Cr и Pb в составе TSP в 2 раза в сравнении с их концентрацией в PM-2,5. Данного рода распределение перечисленных элементов в различных фракциях пыли указывает на разнородность их содержания и различные источники поступления. Известно, что более мелкие частицы в большинстве своем «присутствуют» и источники их формирования могут быть расположены за 100 км от места отбора проб [38]. Однако в данном случае относительно высокие концентрации перечисленных групп элементов обнаружены в крупных частицах, в связи с чем можно предположить, что источником их формирования является почвенный покров исследуемой местности. Далее в результатах по обследованию почв авторами выявлено стабильное распределение этих групп элементов по всему профилю «Восточного» следа.

Что касается равномерно распределенных элементов в крупно- и тонкодисперсных фракциях пыли, то отмечены относительно высокие концентрации максимальных значений группы редкоземельных элементов, таких как La, Ce, Pr, Nd, в составе образцов воздушных аэрозолей, отобранных с постов № 1 (рядом с границей западной части площадки «Опытное поле») и № 5 (фоновый участок г. Курчатов) в сравнении с их содержанием в составе TSP, отобранных с постов № 2 (рядом с границей южной части площадки «Опытное поле»), № 3 (рядом с границей юго-восточной части площадки «Опытное поле») и № 4 (рядом с границей восточной части площадки «Опытное поле»). Превышение по La, Ce, Pr составило от 2 до 3 раз, Nd – в 2 раза соответственно. Содержание остальной группы редкоземельных элементов (Sm, Gd) в составе TSP на всех исследуемых постах распределено равномерно. Исключение составил Eu, концентрация данного элемента в составе TSP, отобранных с постов № 2, 3, 4, превышает в 10 раз его содержание в частицах пыли, собранных с участков № 1 и 5.

Содержание Th в образцах пыли условно фонового поста № 5 превышает в 2 раза его концентрацию в основных постах исследования вблизи границ площадки «Опытное поле» СИП, что, возможно, свидетельствует о дополнительном источнике поступления данного элемента.

Также по полученным результатам можно выделить специфичное поведение Zn в составе общей пыли.

В целом концентрация данного элемента в составе общей пыли со всех исследуемых постов абсолютно идентична, в среднем около 22000 нг/м<sup>3</sup>, что, возможно, свидетельствует об однородности источника поступления (почва) по содержанию данного элемента.

Проведен корреляционный анализ между содержанием химических элементов в составе исследуемых частиц аэрозолей воздуха. По полученным данным выявлены высокие положительные (0,97 %) корреляционные зависимости между содержанием некоторых исследуемых элементов в составе крупных частиц аэрозолей воздуха. Так, например, положительная зависимость установлена для U с Fe, Co, Sr, Cd, Pr, Nd, Sm, а также фиксируется связь между Fe, Co, Sr, Cd, Pr, Nd, Sm с La и Ce в образцах пыли. Отмечается взаимосвязь концентрации в составе пыли As с содержанием Cs, а также выявлены высокая связь Be с большинством химических элементов, что говорит об их одном источнике поступления.

В крупных частицах аэрозолей воздуха для Eu устанавливается обратная корреляционная зависимость с отдельными элементами, что свидетельствует о различных источниках поступления. Для решения этого вопроса необходимо проведение дополнительных исследований.

Проведенный корреляционный анализ между содержанием химических элементов в составе частиц воздуха размером менее 2,5 мкм выявил схожую динамику зависимости концентрации ряда элементов, как и в TSP. Так, в составе PM-2,5 концентрация Pr, Nd, Sm коррелирует с содержанием Ce и U.

Также отмечены определенные различия в накоплении химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха различных диаметров (TSP, PM-2,5). В постах отбора № 2, 3 и 4 концентрация исследуемых элементов от 2 до 10000 раз превышает содержание их в PM-2,5. В постах № 1 и 5 содержание большинства химических элементов в составе TSP и PM-2,5 идентично, за исключением V, Co, Ni, Mo и Pb. По результатам проведенного элементного анализа установлено, что содержание исследуемых групп элементов не превышает предельно допустимые концентрации (ПДК).

По стабильному содержанию V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Cd, Sm, Gd и Th в крупных частицах аэрозолей воздуха можно предположить, что источником их формирования является почвенный покров.

Источником поступления редкоземельных элементов в аэрозоли воздуха можно предположить почвы, поскольку в нижеприведенных результатах (рис. 3, а) отмечается увеличение содержания элементов редкоземельной группы от внешних границ площадки «Опытное поле» в восточном направлении. Относительно высокие содержания данной группы элементов в образцах пыли, отобранных с территории г. Курчатов, в сравнении с их концентрацией в образцах с «Опытного поля», возможно, связано с наличием отходов (золы) котельной и их локальным распространением по почвенному покрову города. В целом взаимосвязи между содержанием элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха испытательной пло-

щадки «Опытное поле» и условно фоновой территории г. Курчатов не наблюдается.

#### Особенности радионуклидного состава почвы

Масштабы и уровни радиоактивных загрязнений после ядерных взрывов зависят от многих факторов: типа ядерных боеприпасов, вида взрывов, мощности, топографических и метеорологических условий. Основными долгоживущими радионуклидами при ядерном взрыве являются  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Количество долгоживущих радионуклидов сначала нарастает, а затем, достигнув максимума, уменьшается. Часть образовавшихся при наземном взрыве радиоактивных продуктов (деления и активации), поднятых с грунтом, оседает непосредственно на месте проведения взрыва. Некоторая часть, связанная со сравнительно небольшими частицами грунта или расплавленных пород, может быть отнесена ветром на значительные расстояния от места взрыва. В результате этого, возможно, образуется радиоактивное загрязнение окружающей среды.

С целью выявления уровней накопления техногенных и естественных радионуклидов в почвенном покрове в зоне воздействия «Восточного» следа СИП были проанализированы образцы почв по профилю (табл. 2, 3).

**Таблица 2.** Содержание техногенных радионуклидов в образцах почв по профилю «Восточного» следа СИП,  $\text{Бк}/\text{кг}$

**Table 2.** Content of man-made radionuclides in soil samples along the profile of the «Vostochny» trace of STS,  $\text{Bq}/\text{kg}$

Расстояние, км Distance, km	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{60}\text{Co}$	$^{152}\text{Eu}$	$^{235}\text{U}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
0	22,0±4,0	3,1±1,0	<0,8	<1,1	<2	110,0±6,8	9,5±1,9
22	17,0±3,0	<0,8	<0,5	<0,7	<1,3	53,0±4,8	3,3±0,7
42	6,8±1,4	<0,7	<0,9	<1,2	<3	13,0±2,2	<0,8
62	21,0±4,0	1,5±0,6	<0,7	<1,4	<3	12,0±2,4	<0,9
72	3,6±0,7	<0,6	<0,8	<1,4	<3	0,9±0,4	<0,9
82	12,0±2,0	<0,5	<0,5	<0,7	<2	13,0±1,8	<0,5
92	1,9±0,4	3,2±0,7	<0,5	<0,7	<1,3	2,3±0,8	<0,4
98	9,1±1,8	<0,5	<0,5	<0,7	<3	25,0±2,7	<0,4
104	4,1±0,8	2,0±0,7	<1,1	<1,5	<1,3	1,5±0,6	<1,0
110	5,8±1,2	<0,6	<0,5	<0,7	<1,2	4,2±1,0	<0,4
116	3,4±0,7	3,3±0,9	<0,8	<1,2	<1,3	1,4±0,6	<0,7
122	6,7±1,3	5,7±0,9	<1,1	<1,4	<3	2,1±0,8	<0,9
130	31,0±6,0	<0,6	<1,3	<1,7	<2	43,0±2,8	<1,2
140	35,0±7,0	3,4±0,8	<1	<1,5	<3	49,0±3,5	2,6±0,5

По представленным данным распределение содержания  $^{90}\text{Sr}$  в исследуемых образцах почвы основного радиоактивного следа имеет эпизодичный характер в сравнении с распределением техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . Так, не выявлены удельные активности  $^{90}\text{Sr}$  на отметках 22, 42, 72, 82, 98, 110, 130 км от границ «Опытного поля» СИП. При этом следует отметить, что выявленные значимые показатели удельной активности данного техногенного изотопа на протяжении всей траектории не имеют пиковых значений. Данные варьируют в пределах от 1,5 до 5,7  $\text{Бк}/\text{кг}$ .

Для содержания изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в образцах почвы характерно более динамичное распределение. Так, в начале отрезка на отметках 0 и 22 км выявлены значения удельной активности, равные 22 и 15  $\text{Бк}/\text{кг}$  соответственно. На отрезках от 72 до 122 км включительно показатели удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  падают до 1,9  $\text{Бк}/\text{кг}$ . Далее на отрезках 130–140 км наблюдается резкое повышение значений удельной активности. Также следует отметить, что на протяжении всего профиля были получены значимые содержания данного радионуклида в образцах почвы.

Техногенные радионуклиды  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$   $^{235}\text{U}$  не обнаружены на протяжении всего «Восточного» следа. Величина удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвенном покрове исследуемой зоны изменяется от 0,9 до 110,0  $\text{Бк}/\text{кг}$ . Максимальные значения удельной активности изотопов плутония были обнаружены в образцах почвы, отобранных непосредственно с территории испытательной площадки «Опытное поле» СИП (рис. 2, точка 1). При этом следует отметить, что данное значение не превышает показателя минимальной удельной значимой активности (МЗУА). Распределение содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  имеет нестабильный характер. В начале и на 130–140 км профиля обнаружены значения удельных активностей 53, 43 и 49  $\text{Бк}/\text{кг}$ , соответственно. В условно обозначенной «середине» профиля величина удельной активности изотопов плутония составила от 0,9 до 25  $\text{Бк}/\text{кг}$ . Значимые показатели  $^{241}\text{Am}$  в почвах «Восточного» следа были обнаружены на 0, 22 и 140 км. Практически на протяжении всей траектории радиоактивного следа в исследуемых образцах почвы не обнаружен данный радиоактивный изотоп.

Радионуклидный состав почв по профилю «Восточного» следа определяется в основном содержанием  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ . По выявленным концентрациям данных радионуклидов наблюдается неоднородное распределение по всему 130 км профилю от внешних границ «Опытного поля». Данного рода распределение, а именно резкое снижение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ , вероятно, связано с наличием пастбищных участков на исследуемой территории.

Также следует отметить, что проведен более детальный анализ образцов почвы, отобранных по профилю «Восточного» следа, на содержание естественных радионуклидов. Естественная радиоактивность на местах радиоактивного следа в большей степени определяется присутствием в почвенном профиле  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ , что согласуется в целом с результатами других авторов [39–43] и наглядно представлено в табл. 3.

Выявленная удельная активность  $^{40}\text{K}$  находится в диапазоне от 520 до 790  $\text{Бк}/\text{кг}$ . Максимальное содержание исследуемого естественного радионуклида отмечается на 140 км от испытательной площадки «Опытное поле», минимальное – на 22 км, соответственно. Важно отметить, что содержание стабильного изотопа калия с атомной массой 39 в исследуемых образцах почвы по профилю колеблется от 15000 до 24000  $\text{мг}/\text{кг}$ , что находится на уровне одного кларка со средним его содержанием в континентальной земной коре.

**Таблица 3.** Содержание естественных радионуклидов в образцах почв по профилю «Восточного» следа СИП, Бк/кг

**Table 3.** Content of natural radionuclides in soil samples along the profile of the «Vostochny» trace of STS, Bq/kg

Расстояние, км Distance, km	$^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{238}\text{U}$
0	$550 \pm 110$	$22,0 \pm 4,0$	$58 \pm 12$	$17,0 \pm 2,6$
22	$520 \pm 100$	$17,0 \pm 3,0$	$50 \pm 10$	$18,0 \pm 2,9$
42	$580 \pm 120$	$28,0 \pm 6,0$	$36 \pm 7$	$20,0 \pm 3,2$
62	$600 \pm 120$	$21,0 \pm 4,0$	$69 \pm 14$	$17,0 \pm 2,7$
72	$610 \pm 120$	$23,0 \pm 5,0$	$35 \pm 7$	$18,0 \pm 2,8$
82	$750 \pm 150$	$13,0 \pm 3,0$	$51 \pm 10$	$9,7 \pm 1,5$
92	$780 \pm 160$	$27,0 \pm 5,0$	$28 \pm 6$	$17,0 \pm 2,6$
98	$770 \pm 150$	$16,0 \pm 3,0$	$33 \pm 7$	$13,0 \pm 2,1$
104	$560 \pm 110$	$9,0 \pm 1,8$	$56 \pm 11$	$11,0 \pm 1,8$
110	$680 \pm 140$	$28,0 \pm 6,0$	$43 \pm 9$	$15,2 \pm 2,4$
116	$530 \pm 110$	$18,0 \pm 4,0$	$81 \pm 16$	$13,2 \pm 2,1$
122	$730 \pm 150$	$49,0 \pm 10,0$	$50 \pm 10$	$34,0 \pm 5,4$
130	$530 \pm 110$	$24,0 \pm 5,0$	$58 \pm 12$	$12,0 \pm 1,9$
140	$790 \pm 160$	$22,0 \pm 4,0$	$44 \pm 9$	$18,0 \pm 2,9$

По всей длине профиля поведение естественного радионуклида  $^{232}\text{Th}$  в почве более динамично. Так, наблюдается резкое понижение удельной активности

$^{232}\text{Th}$  на отрезке 104 км, однако уже на 122 км его содержание повышается до отметки 49 Бк/кг.

Активность  $^{210}\text{Pb}$  в почвах имеет чуть большие значения в сравнении с показателями активности  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  и варьирует в пределах от 28 до 81 Бк/кг.

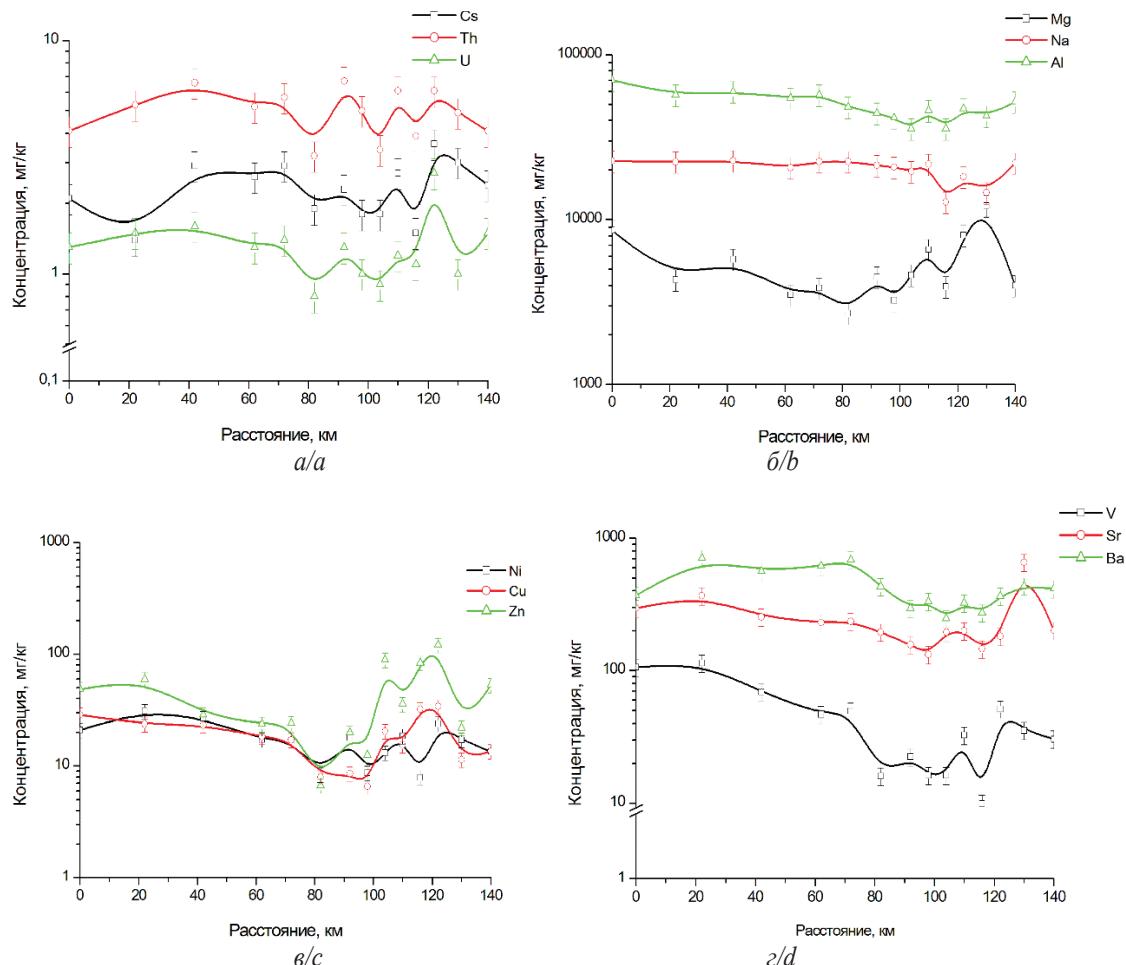
Концентрация  $^{238}\text{U}$  в почвах изучаемой территории также была значительно ниже содержания  $^{40}\text{K}$ , и максимальное его значение составляет 34 Бк/кг на 122 км. Самое низкое

содержание данного изотопа выявлено на 82 км и составило 9,7 Бк/кг.

По «Восточному» следу радиоактивных выпадений в образцах почвы концентрация естественных радионуклидов распределена равномерно. Из этого следует, что состав почвы абсолютно идентичен по содержанию указанных радионуклидов на протяжении всего следа.

#### Особенности элементного состава почвы

По результатам элементного анализа состава образцов почв, отобранных по профилю «Восточного» следа, наблюдается стабильность динамики распределения содержания большинства исследуемых химических элементов на протяжении всего профиля (рис. 3, а–г).



**Рис. 3.** Пространственное распределение содержания Cs, Th, U (а), Mg, Na, Al (б), Ni, Cu, Zn (в), V, Sr, Ba (г) в почвах по профилю «Восточного» следа

**Fig 3.** Spatial distribution of Cs, Th, U (a), Mg, Na, Al (b), Ni, Cu, Zn (c), V, Sr, Ba (d) content in soils along the profile of the «Vostochny» trace

Как видно из данных, в исследуемых образцах почвы содержание представленных групп элементов показало стабильную динамику распределения на отрезке от 0 до 72 км «Восточного» профиля. Исключение из этой группы элементов составляют Na и Al, концентрация их практически стабильна на протяжении всего профиля.

Незначительные пики возрастания концентрации таких элементов, как Cu, Zn, отмечены на расстоянии от 100 до 140 км. Схожую картину по динамике распределения содержания имеет Mg. Его максимальный

пик содержания отмечен на отрезке от 120 до 140 км. Наблюдается незначительное понижение содержания V в образцах почвы по мере удаления от внешних границ СИП.

Следует отметить, что выявленные концентрации Zn и Sr на отметке 122 км превышают их средние содержания в земной коре в 1,6 и 2,4 раза соответственно.

Также выявлена группа элементов, содержание которых имеет схожую динамику распределения в исследуемых образцах почвы по всему профилю (рис. 4, а–г)

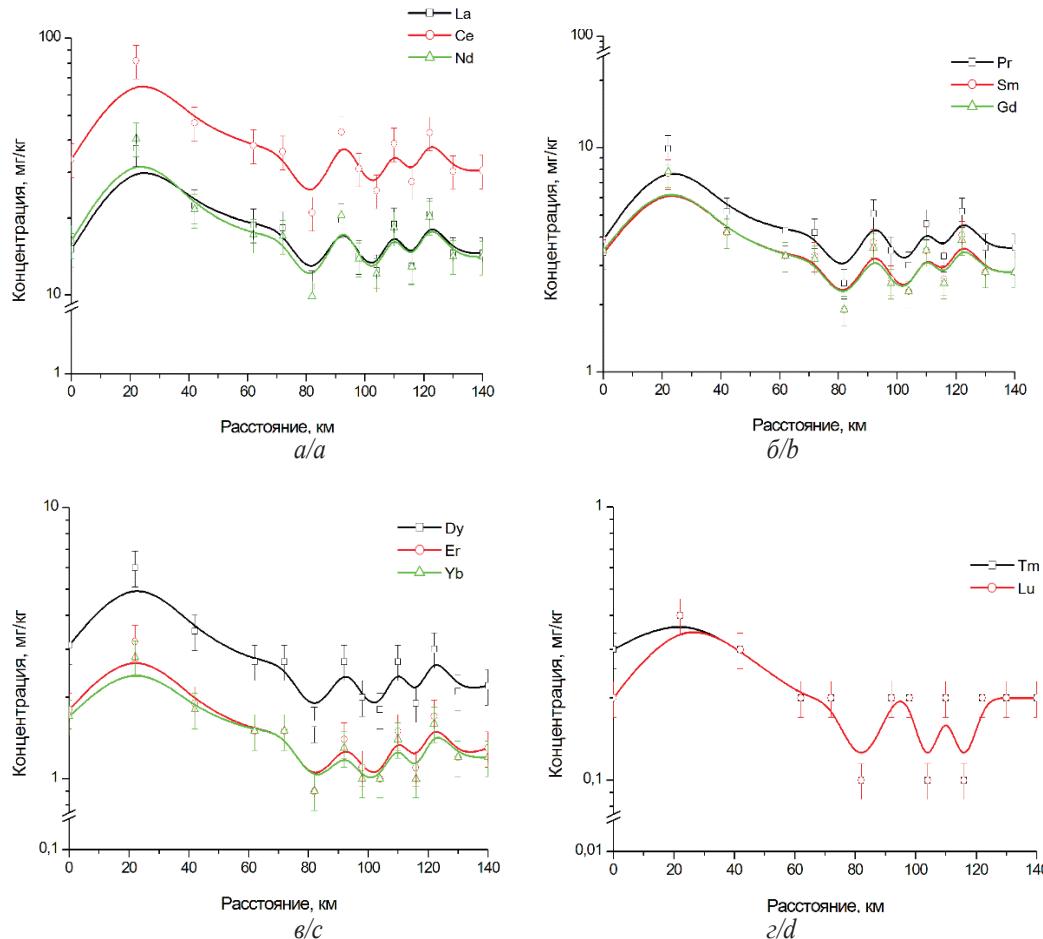


Рис. 4. Пространственное распределение содержания La, Ce, Nd (а), Pr, Sm, Gd (б), Dy, Er, Yb (в), Tm, Lu (г) в почвах по профилю «Восточного» следа

Fig 4. Spatial distribution of La, Ce, Nd (a), Pr, Sm, Gd (b), Dy, Er, Yb (c), Tm, Lu (d) content in soils along the profile of the «Vostochny» trace

Для редкоземельных элементов выявлена некоторая особенность распределения элементов в почвах по профилю, которая проявляется максимальными значениями на 22 км от внешних границ площадки «Опытное поле» в восточном направлении. Далее по профилю содержание их понижается до отметки 82 км. От данной отметки содержание редкоземельных элементов приобретает более динамичный скачкообразный характер. Это особенно четко выражено в динамике поведения концентрации Tm и Lu на отрезке от 80 до 130 км. Так же разница между максимальными и минимальными содержаниями всех исследуемых редкоземельных элементов в образцах почвы

увеличивается в 4 раза. Далее приведены результаты электронной микроскопии образцов почвы, отобранных по профилю «Восточного» следа (рис. 5, а, б).

В ранее проведенных исследованиях по определению содержания химических элементов в образцах почвы, отобранных с территории малого населенного пункта Долонь, непосредственно находящегося в зоне «Восточного» следа радиоактивных выпадений, выявлено схожее распределение концентрации изучаемых химических элементов [44]. Так, например, в образцах почвы обнаружены схожие концентрации элементов La (17,9 мг/кг), Ce (37,6 мг/кг) Pr (4,4), Nd (17,8), Sm (3,5), что абсолютно согласуется с их содержанием,

выявленным в пробах почвы профиля «Восточного» следа. Также следует отметить, что методом сканирующей микроскопии в образцах почвы Долонь были обнаружены частицы меди, как и в почвах исследуемого следа. В двух других населенных пунктах (Бескарагай и Канонерка) [44], расположенных вне зоны воз-

действия «Восточного» следа радиоактивных выпадений, аналогичного поведения исследуемых химических элементов в почве не выявлено. В связи с чем можно предположить, что есть привнесения некоторых химических элементов с территории СИП на прилегающие территории по профилю «Восточного» следа.

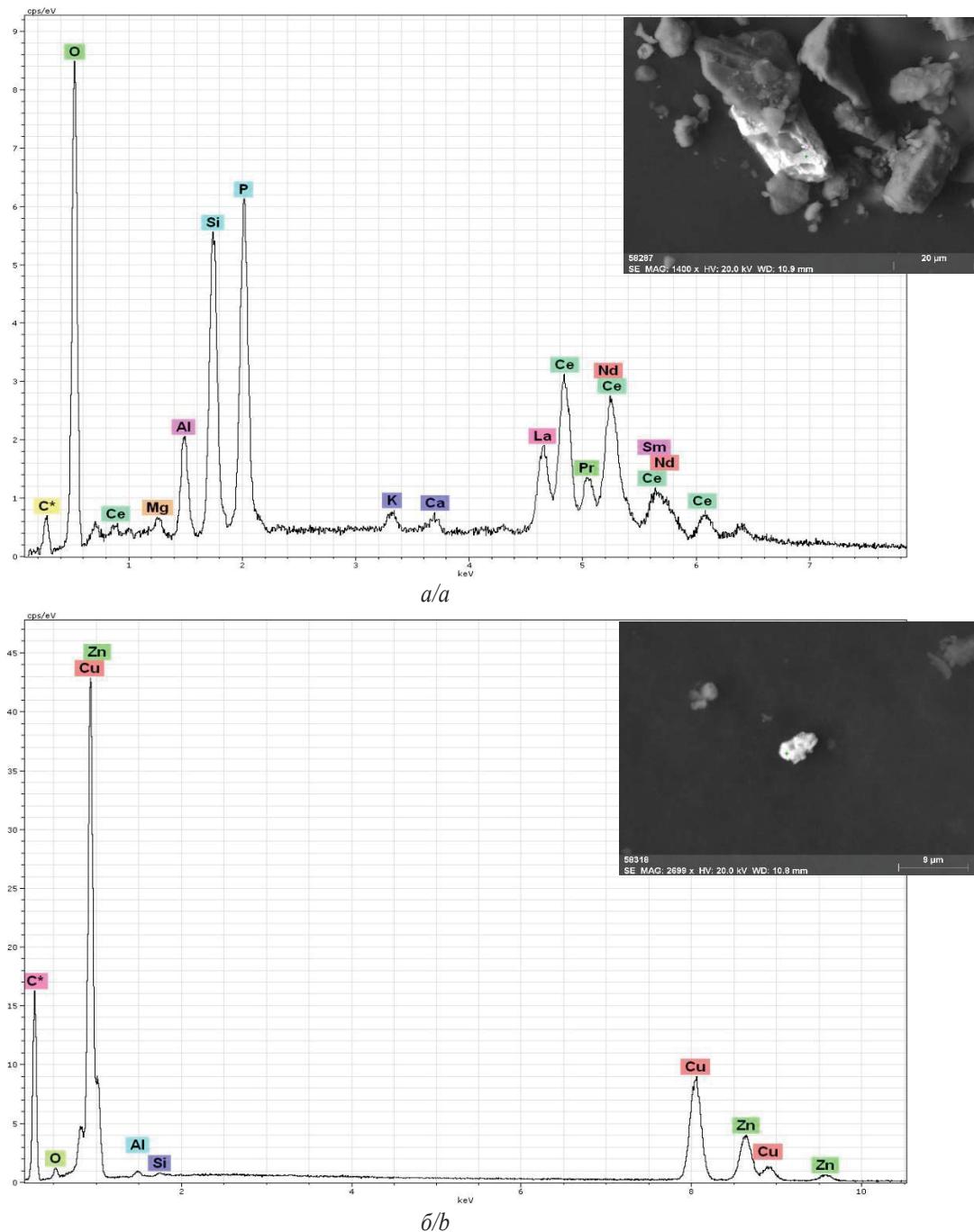


Рис. 5. Образец почвы «Восточного» профиля 42 км: а) редкоземельный минерал; б) Cu-Zn- частица  
 Fig 5. Soil sample of the «Vostochny» profile, 42 km: a) rare-earth mineral; b) Cu-Zn-particle

### Заключение

В целом можно сделать вывод, что в формировании химического состава воздушных аэрозолей «Восточного» следа Семипалатинского испытательного полигона участвует почвенный покров. Причем явной

зависимости между содержанием элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха испытательной площадки «Опытное поле» и условно фоновой территории г. Курчатов не наблюдается. Содержание исследуемых групп элементов в воздушных аэрозолях не превышают предельно допустимые концентрации.

По «Восточному» следу радиоактивных выпадений в образцах почвы концентрация естественных радионуклидов распределена равномерно.

Техногенные радионуклиды  $^{60}\text{Co}$  и  $^{152}\text{Eu}$ , как основные радионуклиды продуктов активации, не обнаружены на протяжении всего «Восточного» следа, а также на протяжении всей траектории радиоактивного следа в исследуемых образцах почвы не обнаружен радиоактивный изотоп  $^{241}\text{Am}$ . Были выявлены значимые содержания  $^{137}\text{Cs}$  в исследуемых образцах почвы в сравнении с изотопом  $^{90}\text{Sr}$ . Данный радионуклид проявляется местами. Не установлено превышения фона глобальных выпадений по значениям, выявленным в исследуемых образцах почвы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

По профилю «Восточного» следа обнаружено динамичное распределение содержания  $^{239+240}\text{Pu}$ , где его концентрация колеблется от 0,9 до 110 Бк/кг. Максимальное значение выявлено в пробе почвы, отобранной непосредственно с участка «Опытное поле» (проба, отобранная на условно «0» км, точка № 1). При этом следует отметить, что данное значение не превышает показателя минимальной удельной значимой активности.

Радионуклидный состав почв прилегающих территорий по профилю «Восточного» следа определяется в основном содержанием  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ . По выявленным концентрациям  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{241}\text{Am}$  в исследуемых образцах почвы не представляется возможность описания их пространственной динамики по следу радиоактивных выпадений. Однако устанавливается неоднородное распределение радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  по профилю «Восточного» следа.

Для группы редкоземельных элементов в почвах профиля «Восточного» следа выявлена одна особенность, которая характеризуется максимальным пиком

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности состава, форм нахождения и распределения радионуклидов на различных площадках СИП / К.К. Кадыржанов, С. Хажекбер, И.В. Казачевский, В.П. Солодухин, С.Н. Лукашенко // Вестник НЯЦ РК Радиоэкология. Охрана окружающей среды. – 2000. – № 3. – С. 15–22.
2. Акчурин И.А. Семипалатинский ядерный полигон. Создание становление, деятельность. – М.: Изд-во «Голден-Би», 2007. – 258 с.
3. Логачев В.А. Ядерные испытания на Семипалатинском полигоне и их влияние на окружающую среду // Вестник НЯЦ РК Радиоэкология. Охрана окружающей среды. – 2000. – № 3. – С. 9–14.
4. Умаров М.А., Артемьев О.И. Радиоактивные выпадения от атмосферных ядерных испытаний // Вестник НЯЦ РК Радиоэкология. Охрана окружающей среды. – 2001. – № 3. – С. 20–25.
5. Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Вып. 5. – Павлодар: Дом печати, 2015. – 356 с.
6. Ядерные испытания СССР. Гидроядерные эксперименты. Инвентаризация затрат plutonия / И.А. Андрюшин, Н.П. Волошин, Р.И. Илькаев, А.М. Матушенко, В.Н. Михайлов, А.К. Чернышев // Инф. бюлл. ЦНИИатоминформ. – 1998. – № 12. – С. 60–63.
7. Логачев В.А. Влияния ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне на состояние здоровья населения Кемеровской и Новосибирской областей // Бюллетень центра общественной информации по атомной энергии. – 1996. – Спецвыпуск (март). – С. 9–15.
8. Комплексные исследования радиоактивного загрязнения системы «Атмосфера – подстилающая поверхность» и оценки радиационных рисков для населения Семипалатинского региона / О.И. Артемьев, А.Ю. Осинцев, Я.И. Газиев, И.И. Крышев, С.К. Гордеев, И.Я. Газиев, А.И. Крышев, Л.В. Колесникова, Б.И. Огородников, В.П. Мартыненко, А.Д. Уваров // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – № 4. – С. 44–52.
9. Characteristics and pollution formation mechanism of atmospheric fine particles in the megacity of Chengdu, China / L. Chen, J. Zhang, X. Huang, H. Li, G. Dong, S. Wei // Atmospheric Research. – 2022. – V. 273. – 106172. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106172> (дата обращения 03.05.2022).
10. Analysis of aerosol particle number size distribution and source attribution at three megacities in China / D. Zhang, Z. Li, H. Wu, T. Wu, R. Ren, Z. Cai, C. Liang, L. Chen // Atmospheric Environment. – 2022. – V. 279. – 119114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119114> (дата обращения 03.05.2022).
11. Pollution characteristics, transport pathways, and potential source regions of PM2.5 and PM10 in Changchun City in 2018 / F. Meng, J. Wang, T. Li, C. Fang // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – V. 17(18). – 6585. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph17186585> (дата обращения 03.05.2022).
12. Cho J.-H., Kim H.-S., Yoon M.-B. The influence of atmospheric blocking on regional PM10 aerosol transport to South Korea during February–March of 2019 // Atmospheric Environment. – 2022. – V. 277. – 119056. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119056> (дата обращения 03.05.2022).

их содержания на 22 км, а далее по профилю содержание их стабильно понижается до отметки 82 км. Относительно стабильную динамику распределения содержания по всему профилю показали следующие элементы: Cs, Th, U, Mg, Na, Al. Выявленное содержание большинства исследуемых химических элементов в образцах почвы по «Восточному» следу абсолютно идентично с их ранее определенной концентрацией в пробах почвы с населенного пункта Долонь. В двух других населенных пунктах (Бескарагай и Канонерка), расположенных вне зоны воздействия «Восточного» следа, радиоактивных выпадений явной схожести динамики распределения исследуемых групп химических элементов в почве не было выявлено. В связи с чем можно предполагать, что с территории СИП есть привнесения некоторых химических элементов на прилегающие территории по профилю «Восточного» следа.

Таким образом, привнесение твердых частиц аэрозолей воздуха (PM-2,5 и TSP) в г. Курчатов с ближайшей к нему испытательной площадки «Опытное поле» не выявлено. Однако отмечаются факты сходства химического состава частиц аэрозолей в воздухе в районе прохождения «Восточного» следа радиоактивных выпадений 1949 г., а также в районе малого населенного пункта Долонь с химическим составом почв вблизи площадки «Опытное поле», что может говорить о некоторой связи этих территорий. Однако механизм такого проявления требует предметного изучения.

Работы частично выполнялись в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН BR09158470), тема 04.01 «Разработка методологии комплексной оценки состояния воздушного бассейна в зоне влияния объектов ЯТЦ» (2021–2023 гг.) при сотрудничестве персонала ИРБЭ РГП НЯЦ РК.

13. Characterization of aerosol pollution in two Hungarian cities in winter 2009–2010 / E. Furu, A. Angyal, Z. Szoboszlai, E. Papp, Z. Török, Z. Kertész // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13 (4). – 554. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13040554> (дата обращения 03.05.2022).
14. Variability of near-surface aerosol composition in Moscow in 2020–2021: episodes of extreme air pollution of different genesis / D.P. Gubanova, A.A. Vinogradova, M.A. Iordanskii, A.I. Skorokhod // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13(4). – 574. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13040574> (дата обращения 03.05.2022).
15. Climate characteristics of dust aerosol and its transport in major global dust source regions / J. Xiong, Z. Tianliang, B. Yongqing, L. Yu, H. Yongxiang, G. Chunwei // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2020. – V. 209. – 105415. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105415> (дата обращения 03.05.2022).
16. Spring aerosol in urban atmosphere of megacity: analytical and statistical assessment for source impacts / O. Popovicheva, S. Padoan, J. Schnelle-Kreis, D.L. Nguyen, T. Adam, M. Kistler, T. Steinkogler, A. Kasper-Giebl, R. Zimmermann, N. Chubarova // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2020. – V. 20. – № 4. – P. 702–719. URL: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.08.0412> (дата обращения 03.05.2022).
17. Smoke aerosols dispersion and transport from the 2013 New South Wales (Australia) bushfires / H.N. Duc, L.T.C. Chang, M. Azzi, J. Ningbo // *Environmental monitoring and assessment*. – 2018. – V. 190. – № 7. – 428. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6810-4> (дата обращения 03.05.2022).
18. Detection of Saharan mineral dust aerosol transport over brazilian northeast through a depolarization lidar / A.G. Guedes, E. Landulfo, E. Montilla-Rosero, F.J.S. Lopes, J.J. Hoelzemann, J.H. Fernandez, M.P.A. Silva, R.S.S. Santos, J.L. Guerrero-Rascado, L. Alados-Arboledas // *EPJ Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2018. – V. 176. – 05036. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817605036> (дата обращения 03.05.2022).
19. The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles / M. Van Der Does, P. Knippertz, P. Zschenderlein, R.G. Harrison, J-B.W. Stuut // *Science advances*. – 2018. – V. 4. – № 12. – eaau2768. DOI: 10.1126/sciadv.aau2768
20. Physical and chemical properties of atmospheric aerosols in Moscow and its suburb for climate assessments / D.P. Gubanova, N.F. Elansky, A.I. Skorokhod, T.M. Kuderina, M.A. Iordanskii, N.V. Sadovskaya, P.P. Anikin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – T. 606. – № 1. – 012019. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012019> (дата обращения 03.05.2022).
21. Elemental composition of aerosols in the near-surface air of Moscow: seasonal changes in 2019 and 2020 / D.P. Gubanova, M.A. Iordanskii, T.M. Kuderina, A.I. Skorokhod, N.F. Elansky, V.M. Minashkin // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2021. – V. 34. – № 5. – P. 475–482. DOI: 10.1134/S1024856021050122
22. Chemical composition and source apportionment of atmospheric aerosols on the Namibian coast / D. Klopper, P. Formenti, A. Namwoonde, M. Cazaunau, S. Chevaillier, A. Feron, C. Gaimoz, P. Hease, F. Lahmidi, C. Mirande-Bret, S. Triquet, Z. Zeng, S.J. Piketh // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2020. – V. 20. – № 24. – P. 15811–15833. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-20-15811-2020> (дата обращения 03.05.2022).
23. Elemental composition of dust aerosols near cement plants based on the study of samples of the solid phase of the snow cover / D.A. Volodina, A.V. Talovskaya, A.Y. Devyatova, A.V. Edelev, E.G. Yazikov // *Pure and Applied Chemistry*. – 2022. – 94 (3). – P. 269–274. URL: <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0315> (дата обращения 03.05.2022).
24. Analysis of the content of chemical elements in aerosols using data from passive sampling at Fonovaya observatory / V.S. Buchelnikov, A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, D.V. Simonenkov, B.D. Belan, M.P. Tentyukov // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2020. – 33 (5). – P. 490–495. DOI: 10.1134/S1024856020050061
25. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, E.A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T.S. Shakhova // *Environmental Technology* (United Kingdom). – 2018. – 39 (18). – P. 2288–2303. DOI: 10.1080/0959330.2017.1354075
26. Gaberšek M., Watts M.J., Gosar M. Attic dust: an archive of historical air contamination of the urban environment and potential hazard to health? // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – V. 432. – 128745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128745> (дата обращения 03.05.2022).
27. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity / D. Vlasov, N. Kasimov, I. Eremina, G. Shinkareva, N. Chubarova // *Atmospheric Pollution Research*. – 2021. – V. 12 (1). – P. 255–271. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.012> (дата обращения 03.05.2022).
28. Ukrainstev A.V., Plyusnin A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia) // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 122. – 104723. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104723> (дата обращения 03.05.2022).
29. Seasonal variations and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM2.5 in Nanjing, a megacity in southeastern China / X. Zhang, X. Zhao, G. Ji, R. Ying, Y. Shan, Y. Lin // *Journal of Atmospheric Chemistry*. – 2019. – V. 76 (1). – P. 73–88. URL: <https://doi.org/10.1007/s10874-019-09388-z> (дата обращения 03.05.2022).
30. Particulate matter ionic and elemental composition during the winter season: a comparative study among rural, urban and remote sites in Southern Italy / E. Chianese, G. Tirimberio, A. Dinoi, D. Cesari, D. Contini, P. Bonasoni, A. Marinoni, V. Andreoli, V. Mannarino, S. Moretti, A. Naccarato, F. Sprovieri, I. Ammoscato, C.R. Calidonna, D. Gulli, A. Riccio // *Atmosphere*. – 2022. – 13 (2). – 356. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13020356> (дата обращения 03.05.2022).
31. Elemental composition of fine and coarse particles across the greater Los Angeles area: spatial variation and contributing sources / F. Oroumihesh, M. Jerrett, I. Del Rosario, J. Lipsitt, J. Liu, S.E. Paulson, B. Ritz, J.J. Schauer, M.M. Shafer, J. Shen, S. Weichenthal, S. Banerjee, Y. Zhu // *Environmental Pollution*. – 2022. – V. 292. – 118356. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118356> (дата обращения 03.05.2022).
32. Particulate matter geochemistry of a highly industrialized region in the Caribbean: Basis for future toxicological studies / L.F.O. Silva, I.L. Schneider, P. Artaxo, Y. Núñez-Blanco, D. Pinto, É.M.M. Flores, L. Gómez-Plata, O. Ramírez, G.L. Dotto // *Geoscience Frontiers*. – 2022. – V. 13 (1). – 101115. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.012> (дата обращения 03.05.2022).
33. Quantification and characterization of metals in ultrafine road dust particles / S. Beauchemin, C. Levesque, C.L.S. Wiseman, P.E. Rasmussen // *Atmosphere*. – 2021. – V. 12 (12). – 1564. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12121564> (дата обращения 03.05.2022).
34. Morantes G., González J.C., Rincón G. Characterisation of particulate matter and identification of emission sources in Greater Caracas, Venezuela // *Air Quality, Atmosphere and Health*. – 2021. – 14 (12). – P. 1989–2014. URL: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01070-2> (дата обращения 03.05.2022).
35. ГН 70. Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, на территориях промышленных организаций от 02 августа 2022 года № 70. – Астана: Адилет, 2022. – 247 с. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/history> (дата обращения 25.08.2022).
36. Техническая справка о результатах работ по этапу 04.01.01: «Выбор и обоснование методов определения искусственных (естественных) радионуклидов и химических токсикантов в воздушной среде на примере загрязненных территорий» тема 04.01 «Разработка методологии комплексной оценки состояния воздушного бассейна в зоне влияния объектов ЯТЦ». Научно-техническая программа «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан». – Курчатов: МРНТИ 58.01.94; 87.17.81, 2021. – 43 с.
37. ГН 71. Гигиенические нормативы «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности» от 02 августа 2022 года № 71. – Астана: Адилет, 2022. – 149 с. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010671/history> (дата обращения 25.08.2022).
38. Report E88189 «Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution» / M. Amann, R. Derwent, B. Forsberg, F. Hurley, M. Krzyzanowski, B. Kuna-Dibbert, S. Larssen,

- F. de Leeuw, S. J. Liu, J. Schneider, P.E. Schwarze, D. Simpson, J. Stedman, P. Straehl, L. Tarrasón, L. van Bree // European Centre for Environment and Health Bonn Office Joint WHO. Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. – 2006. – 113 p. URL: [https://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0006/78657/E88189.pdf](https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/78657/E88189.pdf) (дата обращения 03.05.2022).
39. Królik E., Karwowska J. Potassium-40 and Cesium-137 in the surface layers of arable soils and food supplies // Polish J. of Environ. Stud. – 2010. – V. 19 (3). – P. 599–604. URL: <http://www.pjoes.com/Potassium-40-and-Cesium-137-in-the-Surface-r-nLayers-of-Arable-Soils-and-Food-Supplies,88424,0,2.html> (дата обращения 03.05.2022).
40. Natural radioactivity in soils of the province of Caceres (Spain) / A. Baeza, M. del Rio, C. Miro, J.M. Paniagua // Radiation Protection Dosimetry. – 1992. – V. 45 (1/4). – P. 261–263. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/45.1-4.261> (дата обращения 03.05.2022).
41. Миграция радиоактивных элементов в медоносных растениях, культивируемых в северном и западном районах Самарской области / В.С. Григорьев, С.И. Чучалов, Р.И. Александров, Е.П. Алексеев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 4 (56). – С. 1–7. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-3
42. Radioactivity of soils in Mtskheta-Mtianeti region (Georgia) / N. Kekelidze, T. Jakutashvili, B. Tutberidze, E. Tulashvili, M. Akhalkatsishvili, L. Mtsariashvili // Annals of Agrarian Sciences. – 2017. – V. 15 (3). – P. 304–311. DOI: 10.1016/j.aasci.2017.07.003
43. Pb-210 in rock and soils of the Semi-Arid Agreste Region of Pernambuco, Brazil / C.M. Silva, R.S. Amaral, J.N. Tabosa, J.A. Santos Júnior, R.S.C. Menezes, E.E.G. Farias, J.D. Bezerra, R.G. Silvestre, G.F. Oliveira // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2009. – V. 82. – P. 647–649. DOI: 10.1007/s00128-009-9669
44. Сезонная динамика содержания химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха малых населенных пунктов, расположенных в зоне влияния «Восточного» следа радиоактивных выпадений Семипалатинского испытательного полигона / А.Е. Темиржанова, Е.Г. Язиков, М.Т. Дюсембаева, Е.З. Шакенов, Н.Ж. Мухамедияров, А.Ж. Ташекова, Г.М. Есильканов, В.В. Колбин, М.А. Умаров // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 189–199. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3346>

Поступила 15.06.2022 г.

### Информация об авторах

**Темиржанова А.Е.**, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Язиков Е.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мухамедияров Н.Ж.**, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Сальменбаев С.Е.**, начальник группы исследований высокоактивных образцов Лаборатории радиохимических исследований Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Умаров М.А.**, заместитель директора Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Есильканов Г.М.**, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Ташекова А.Ж.**, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

UDC 539.16:546:551.510.7:502(574.41)

## ASSESSMENT OF CHEMICAL ELEMENT CONTENT IN THE NATURAL ENVIRONMENT COMPONENTS OF THE «VOSTOCHNY» TRACE OF THE RADIOACTIVE FALLOUT AT THE SEMIPALATINSK TEST SITE

**Arai Y. Temirzhanova<sup>1</sup>,**  
temirzhanova.aray@mail.ru

**Egor G. Yazikov<sup>2</sup>,**  
yazikoveg@tpu.ru

**Nurlan Zh. Mukhamediyarov<sup>1</sup>,**  
mukhamediyarov@nnc.kz

**Sayan E. Salmenbaev<sup>1</sup>,**  
salmenbayev@nnc.kz

**Murat A. Umarov<sup>1</sup>,**  
Umarov@nnc.kz

**Gani M. Yesilkanov<sup>1</sup>,**  
yessilkanov@nnc.kz

**Azhar Zh. Tashekova<sup>1</sup>,**  
Esenzholova@nnc.kz

<sup>1</sup> National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,  
2, Beibit Atom street, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

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

**Relevance** of this work is attributed to the fact that no activities were carried out to assess the content of the chemical composition in environmental components including heavy metals and toxicants along the «Vostochny» fallout plume identified by the radioecological survey of areas adjacent to the Semipalatinsk Test Site. A concurrent survey of air aerosol particulate matter and soil composition at the «Optynoe pole» site, at which atmospheric/aboveground-air nuclear tests were conducted, will provide a complete picture on potential sources of a radionuclide and chemical composition of environmental components formed in the «Vostochny» trace as well as of migration pathways of some elements and radionuclides incorporated in air aerosols. The survey of the north-eastern test site part, along the passing fallout trace, including settlements with agricultural activities, is especially topical to the population living there.

**The objective** of this paper is to evaluate accumulation levels of radionuclides and chemical elements in soil cover of the impact zone of the «Vostochny» trace at the Semipalatinsk Test Site as well as to reveal a possible input of certain chemical elements and radionuclides from the Semipalatinsk Test Site territory to adjacent areas along the «Vostochny» plume profile.

**Objects:** soil, air aerosol particulate matter.

**Techniques.** Samples were analyzed by alpha-, beta- and gamma-spectrometry, inductively coupled plasma mass-spectrometry, inductively coupled plasma atomic-emission spectrometry, by radiochemistry and scanning electronic microscopy; statistical processing of analytical results on the main environmental components of interest; assessment of the dynamics of spatial distribution of the content of radionuclides and chemical elements in samples of soil and air aerosol particulate matter in the study area.

**Results.** Chemical compositions (radionuclide and elemental) of soil cover in the profile of the «Vostochny» trace and 2,5  $\mu$ m air aerosol particulate matter and total suspended particles, collected from areas located close to boundaries of the Semipalatinsk Test Site «Optynoe pole» site, were studied. A spatial distribution of concentrations of chemical element groups under study and radionuclides in soil cover was identified in the «Vostochny» fallout trace. The correlation analysis of the content of elements in air samples allowed identification of associations of elements being characteristic of both fine particles (PM-2,5) and total suspended air particles at the Semipalatinsk Test Site «Optynoe pole» testing site. The content of almost all chemical elements of interest incorporated in air aerosol particulate matter does not exceed permissible levels – maximum permissible concentrations.

### Key words:

Soil, air aerosol particulate matter, surface air, chemical elements, radionuclides, transfer by wind.

The work was partly done under the scientific and technical program «Development of atomic energy in the Republic of Kazakhstan» (ARN BR09158470), subject 04.01 «Development of a methodology on the comprehensive assessment of the air basin conditions in the impact zone of NFC facilities» (2021–2023) in cooperation with the staff of IRSE RSE NNC RK.

### REFERENCES

1. Kadyrhanov K.K., Khazhekber S., Kazachevskiy I.V., Solodukhin V.P., Lukashenko S.N. Features of composition, its revealed forms and allocation at different STS platforms. *NNC RK Bulletin. Radioecology and environment protection*, 2000, no. 3, pp. 15–22. In Rus.
2. Akchurin I.A. *Semipalatinskiy yaderny poligon. Sozdanie stanovlenie, deyatelnost* [Semipalatinsk nuclear test site. Creation, formation, activity]. Moscow, Golden-Bi Publ., 2007. 258 p.
3. Logachev V.A. Nuclear tests at Semipalatinsk test site and their environmental impact. *NNC RK Bulletin. Radioecology and environment protection*, 2000, no. 3, pp. 9–14. In Rus.
4. Umarov M.A., Artem'yev O.I. Radioactive fallout due to atmospheric nuclear tests. *NNC RK Bulletin. Radioecology and environment protection*, 2001, no 3, pp. 20–25. In Rus.
5. Lukashenko. S.N. *Aktualnye voprosy radioekologii Kazakhstana* [Topical issues of radioecology of Kazakhstan]. Pavlodar, Dom pechati Publ., 2015. Iss. 5, 356 p.
6. Andryushin I.A., Voloshin N.P., Ilkayev R.I., Matushchenko A.M., Mikhaylov V.N., Chernyshev A.K. *Yadernye ispytaniya SSSR. Gidroyadernye eksperimenty. Inventarizatsiya zatrata plutoniya* [Nuclear Tests of the USSR. hydronuclear experiments. Inventory of plutonium costs]. *Inf. byull. TSNIIatominform*, 1998, no. 12, pp. 60–63.
7. Logachev V.A. *Vliyaniya yadernykh ispytaniy na Semipalatinskem poligone na sostoyanie zdorovya naseleniya Kemerov*

- skoy i Novosibirskoy oblastey [Influence of nuclear tests at the Semipalatinsk test site on the state of health of the population of the Kemerovo and Novosibirsk regions]. *Byulleten tsentralnoi obshchestvennoi informatsii po atomnoy energii*, 1996, Special Issue (March), pp. 9–15.
8. Artem'yev O.I., Osintsev A.Yu., Gaziyev Ya.I., Kryshev I.I., Gordeyev S.K., Gaziyev I.Ya., Kryshev A.I., Kolesnikova L.V., Ogorodnikov B.I., Martynenko V.P., Uvarov A.D. Integrated study of radioactive contamination of «atmosphere-geological substrate» system and radiation risk assessment for population of Semipalatinsk region. *NNC RK Bulletin*, 2007, no 4, pp. 44–52. In Rus.
  9. Chen L., Zhang J., Huang X., Li H., Dong G., Wei S. Characteristics and pollution formation mechanism of atmospheric fine particles in the megacity of Chengdu, China. *Atmospheric Research*, 2022, vol. 273, 106172. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106172> (accessed 3 May 2022).
  10. Zhang D., Li Z., Wu H., Wu T., Ren R., Cai Z., Liang C., Chen L. Analysis of aerosol particle number size distribution and source attribution at three megacities in China. *Atmospheric Environment*, 2022, vol. 279, 119114. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119114> (accessed 3 May 2022).
  11. Meng F., Wang J., Li T., Fang C. Pollution characteristics, transport pathways, and potential source regions of PM2.5 and PM10 in Changchun city in 2018. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17 (18), 6585. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph17186585> (accessed 3 May 2022).
  12. Cho J.-H., Kim H.-S., Yoon M.-B. The influence of atmospheric blocking on regional PM10 aerosol transport to South Korea during February–March of 2019. *Atmospheric Environment*, 2022, vol. 277, 119056. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119056> (accessed 3 May 2022).
  13. Furu E., Angyal A., Szoboszlai Z., Papp E., Török Z., Kertész Z. Characterization of aerosol pollution in two Hungarian cities in winter 2009–2010. *Atmosphere*, 2022, vol. 13 (4), 554. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13040554> (accessed 3 May 2022).
  14. Gubanova D.P., Vinogradova A.A., Iordanskii M.A., Skorokhod A.I. Variability of near-surface aerosol composition in Moscow in 2020–2021: episodes of extreme air pollution of different genesis. *Atmosphere*, 2022, vol. 13 (4), 574. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13040574> (accessed 3 May 2022).
  15. Xiong J., Tianliang Z., Yongqing B., Yu L., Yongxiang H., Chunwei G. Climate characteristics of dust aerosol and its transport in major global dust source regions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, vol. 209, 105415. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105415> (accessed 3 May 2022).
  16. Popovicheva O., Padoan S., Schnelle-Kreis J., Nguyen D.L., Adam T., Kistler M., Steinkogler T., Kasper-Giebl A., Zimmermann R., Chubarova N. Spring Aerosol in urban atmosphere of megacity: analytical and statistical assessment for source impacts. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 702–719. Available at: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.08.0412> (accessed 3 May 2022).
  17. Duc H.N., Chang L.T.C., Azzi M., Ningbo J. Smoke aerosols dispersion and transport from the 2013 New South Wales (Australia) bushfires. *Environmental monitoring and assessment*, 2018, vol. 190, no. 7, 428. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6810-4> (accessed 3 May 2022).
  18. Guedes A.G., Landulfo E., Montilla-Rosero E., Lopes F.J.S., Hoelzemann J.J., Fernandez J.H., Silva M.P.A., Santos R.S.S., Guerrero-Rascado J.L., Alados-Arboledas L. Detection of Saharan mineral dust aerosol transport over Brazilian northeast through a depolarization lidar. *EPJ Web of Conferences. EDP Sciences*, 2018, vol. 176, 05036. Available at: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817605036> (accessed 3 May 2022).
  19. Van Der Does M., Knippertz P., Zschenderlein P., Harrison R.G., Stuut J.-B.W. The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles. *Science advances*, 2018, vol. 4, no. 12, eaau2768. DOI: 10.1126/sciadv.aau2768
  20. Gubanova D.P., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Kuderina T.M., Iordanskii M.A., Sadovskaya N.V., Anikin P.P. Physical and chemical properties of atmospheric aerosols in Moscow and its suburb for climate assessments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020, vol. 606, no. 1, 012019. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012019> (accessed 3 May 2022).
  21. Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Kuderina T.M., Skorokhod A.I., Elansky N.F., Minashkin V.M. Elemental composition of aerosols in the near-surface air of Moscow: seasonal changes in 2019 and 2020. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2021, vol. 34, no. 5, pp. 475–482. DOI: 10.1134/S1024856021050122
  22. Klopper D., Formenti P., Namwoonde A., Cazaunau M., Chevaillier S., Feron A., Gaimoz C., Hease P., Lahmadi F., Mirande-Bret C., Triquet S., Zeng Z., Piketh S.J. Chemical composition and source apportionment of atmospheric aerosols on the Namibian coast. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, vol. 20, no. 24, pp. 15811–15833. Available at: <https://doi.org/10.5194/acp-20-15811-2020> (accessed 3 May 2022).
  23. Volodina D.A., Talovskaya A.V., Devyatova A.Y., Edelev A.V., Yazikov E.G. Elemental composition of dust aerosols near cement plants based on the study of samples of the solid phase of the snow cover. *Pure and Applied Chemistry*, 2022, 94 (3), pp. 269–274. Available at: <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0315> (accessed 3 May 2022).
  24. Buechelnikov V.S., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Simonenkov D.V., Belan B.D., Tentyukov M.P. Analysis of the content of chemical elements in aerosols using data from passive sampling at Fonovaya observatory. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, 33 (5), pp. 490–495. DOI: 10.1134/S1024856020050061
  25. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C., Kim J., Shakhova T.S. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology (United Kingdom)*, 2018, 39 (18), pp. 2288–2303. DOI: 10.1080/0959330.2017.1354075
  26. Gaberšek M., Watts M.J., Gosar M. Attic dust: an archive of historical air contamination of the urban environment and potential hazard to health? *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 432, 128745. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128745> (accessed 3 May 2022).
  27. Vlasov D., Kasimov N., Eremina I., Shinkareva G., Chubarova N. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, vol. 12 (1), pp. 255–271. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.012> (accessed 3 May 2022).
  28. Ukrainstev A.V., Plyusnin A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 122, 104723. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104723> (accessed 3 May 2022).
  29. Zhang X., Zhao X., Ji G., Ying R., Shan Y., Lin Y. Seasonal variations and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM2.5 in Nanjing, a megacity in southeastern China. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2019, vol. 76 (1), pp. 73–88. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10874-019-09388-z> (accessed 3 May 2022).
  30. Chianese E., Tirimberio G., Dinoi A., Cesari D., Contini D., Bonasoni P., Marinoni A., Andreoli V., Mannarino V., Moretti S., Naccarato A., Sprovieri F., Ammosato I., Calidonna C.R., Gulli D., Riccio A. Particulate matter ionic and elemental composition during the winter season: a comparative study among rural, urban and remote sites in Southern Italy. *Atmosphere*, 2022, 13 (2), 356. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13020356> (accessed 3 May 2022).
  31. Oroumiyah F., Jerrett M., Del Rosario I., Lipsitt J., Liu J., Paulson S.E., Ritz B., Schauer J.J., Shafer M.M., Shen J., Weichenthal S., Banerjee S., Zhu Y. Elemental composition of fine and coarse particles across the greater Los Angeles area: Spatial variation and contributing sources. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 292, 118356 Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118356> (accessed 3 May 2022).
  32. Silva L.F.O., Schneider I.L., Artaxo P., Núñez-Blanco Y., Pinto D., Flores É.M.M., Gómez-Plata L., Ramírez O., Dotto G.L. Particulate matter geochemistry of a highly industrialized region in the Caribbean: Basis for future toxicological studies. *Geoscience Frontiers*, 2022, vol. 13 (1), 101115. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.012> (accessed 3 May 2022).
  33. Beauchemin S., Levesque C., Wiseman C.L.S., Rasmussen P.E. Quantification and Characterization of Metals in Ultrafine Road Dust Particles. *Atmosphere*, 2021, vol. 12 (12), 1564. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12121564> (accessed 3 May 2022).

34. Morantes G., González J.C., Rincón G. Characterisation of particulate matter and identification of emission sources in Greater Caracas, Venezuela. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2021, 14 (12), pp. 1989–2014. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01070-2> (accessed 3 May 2022).
35. *GN 70. Gigienicheskie normativy k atmosfernomu vozdukhu v gorodskikh i selskikh naselennykh punktakh, na territoriyakh promyshlennykh organizatsiy ot 02 avgusta 2022 goda № 70* [Hygienic standards for atmospheric air in urban and rural settlements, on the territories of industrial organizations dated August 02, 2022 No. 70]. Astana, Adilet Publ., 2022. 247 p. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/history> (accessed 25 August 2022).
36. *Tekhnicheskaya spravka o rezulatakh rabot po etapu 04.01.01: «Vybor i obosnovanie metodov opredeleniya iskusstvennykh (estestvennykh) radionuklidov i khimicheskikh toksikantov v vozdushnoy srede na primere zagryaznennykh territoriy» tema 04.01 «Razrabotka metodologii kompleksnoy otsenki sostoyaniya vozduchnogo basseyna v zone vliyaniya obyektor YATTS»* [«Selection and justification of methods for determining artificial (natural) radionuclides and chemical toxicants in the air on the example of contaminated territories» topic 04.01 «Development of a methodology for a comprehensive assessment of the state of the air basin in the zone of influence of NFC facilities»]. Nauchno-tehnicheskaya programma «Razvitiye atomnoy energetiki v Respublike Kazakhstan». Kurchatov, international rubricator of scientific and technical information 58.01.94; 87.17.81, 2021. 43 p.
37. *GN 71. Gigienicheskie normativy «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti» ot 02 avgusta 2022 goda № 71* [Sanitary and epidemiological requirements for ensuring radiation safety]. Astana, Adilet Publ., 2022. 149 p. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010671/history> (accessed 25 August 2022).
38. Amann M., Derwent R., Forsberg B., Hurley F., Krzyzanowski M., Kuna-Dibbert B., Larssen S., de Leeuw F., Liu S.J., Schneider J., Schwarze P.E., Simpson D., Stedman J., Straehl P., Tarrasón L., Van Bree L. Report E88189 «Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution». *European Centre for Environment and Health Bonn Office Joint WHO. Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution*, 2006. 113 p.
39. Available at: [https://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0006/78657/E88189.pdf](https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/78657/E88189.pdf) (accessed 3 May 2022).
40. Królik E., Karwowska J. Potassium-40 and Cesium-137 in the Surface Layers of Arable Soils and Food Supplies. *Polish J. of Environ. Stud.*, 2010, vol. 19 (3), pp. 599–604. Available at: <http://www.pjoes.com/Potassium-40-and-Cesium-137-in-the-Surface-r-nLayers-of-Arable-Soils-and-Food-Supplies.88424,0,2.html> (accessed 3 May 2022).
41. Baeza A., Del Rio M., Miro C., Paniagua J.M. Natural radioactivity in soils of the province of Cáceres (Spain). *Radiation Protection Dosimetry*, 1992, vol. 45 (1/4), pp. 261–263. Available at: <https://doi.org/10.1093/rpd/45.1-4.261> (accessed 3 May 2022).
42. Grigoryev V.S., Chuchkalov S.I., Aleksandrov R.I., Alekseyev E.P. Migration of radioactive elements in honey plants cultivated in the northern and western regions of the Samara region. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and higher professional education*, 2019, vol. 4, no. 56, pp. 1–7. In Rus. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-3.
43. Kekelidze N., Jakutashvili T., Tutberidze B., Tulashvili E., Akhalkatsishvili M., Mtsariashvili L. Radioactivity of soils in Mtskheta-Mtianeti region (Georgia). *Annals of Agrarian Sciences*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 304–311. DOI: 10.1016/j.aasci.2017.07.003
44. Silva C.M., Amaral R.S., Tabosa J.N., Santos Júnior J.A., Menezes R.S.C., Farias E.E.G., Bezerra J.D., Silvestre R.G., Oliveira G.F. Pb-210 in Rock and Soils of the Semi-Arid Agreste Region of Pernambuco, Brazil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2009, vol. 82, pp. 647–649. DOI: 10.1007/s00128-009-9669
45. Temirzhanova A.Ye., Yazikov E.G., Dyusembayeva M.T., Shakenov Ye.Z., Mukhamediyarov N.Zh., Tashekova A.Zh., Yesilkanov G.M., Kolbin V.V., Umarov M.A. Seasonal dynamics of the content of chemical elements in particulate aerosols in the air of small settlements located in the zone of influence of the «Vostochny» trace of radioactive fallout from the Semipalatinsk test site. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 189–199. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3346>

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

**Arai Y. Temirzhanova**, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Egor G. Yazikov**, Dr. Sc., professor, National Tomsk Research Polytechnic University.

**Nurlan Zh. Mukhamediyarov**, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Sayan E. Salmenbaev**, head of High Level Samples Research Group, National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan.

**Murat A. Umarov**, deputy director of the Institute of Radiation Safety and Ecology, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Gani M. Yesilkanov**, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Azhar Zh. Tashekova**, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

## СОСТАВ СМОЛИСТО-АСФАЛЬТЕНОВЫХ И МАСЛЯНЫХ КОМПОНЕНТОВ ТЯЖЕЛЫХ НЕФЕЙ

Герасимова Наталья Николаевна<sup>1</sup>,  
dm@ipc.tsc.ru

Чешкова Татьяна Викторовна<sup>1</sup>,  
chtv12@mail.ru

Коваленко Елена Юрьевна<sup>1</sup>,  
kovalenko@ipc.tsc.ru

Сагаченко Татьяна Анатольевна<sup>1</sup>,  
dissovet@ipc.tsc.ru

Мин Раиса Сергеевна<sup>1</sup>,  
Igosn@ipc.tsc.ru

Огородников Владимир Данилович<sup>1</sup>,  
ovod@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью расширения объема данных о смолисто-асфальтеновых веществах и масляных компонентах тяжелых нефей, доля которых в составе добываемого и перерабатываемого углеводородного сырья неуклонно растет. Высокое содержание асфальтенов, смол и гетероатомных соединений осложняет переработку таких нефей по существующим базовым технологиям. Для разработки инновационных технических решений рационального использования тяжелых нефей большое значение имеет информация о составе и строении их компонентов. Это связано, в первую очередь, с тем, что смолы и асфальтены считаются важным резервом углубленной переработки нефтяного сырья, а масла – основой для производства товарных нефтепродуктов.

**Цель:** изучение структурно-группового состава макромолекул асфальтенов и смол и молекулярного состава масел тяжелых нефей, отобранных в различных нефтегазоносных провинциях и различающихся возрастом вмещающих отложений и содержанием смолисто-асфальтеновых и масляных компонентов.

**Методы:** жидкостно-адсорбционная хроматография, элементный анализ, криоскопия в бензole, <sup>1</sup>H ЯМР спектроскопия, структурно-групповой анализ, хроматомасс-спектрометрия.

**Результаты.** Приведена сравнительная характеристика состава и структуры макромолекул смолисто-асфальтеновых веществ и молекулярного состава масел тяжелых нефей Ашальчинского (I), Усинского (II) и Нурлатского (III) месторождений, различающихся возрастом вмещающих отложений (пермь, пермо-карбон и девон, соответственно), содержанием этих компонентов и гетероатомов. Установлено, что содержание асфальтено и смол в ряду тяжелых нефей I-II-III возрастает. При этом снижается их средняя молекулярная масса и становятся меньше общие размеры их усредненных молекул. Это обусловлено снижением количества структурных блоков, которые становятся более компактными за счет уменьшения общего количества колец в нафтоароматической системе, главным образом нафтеновых. При этом число атомов углерода в парафиновых фрагментах структурных блоков усредненных молекул возрастает. Наблюдаются изменения структурных параметров молекул наиболее ярко проявляются для смолисто-асфальтеновых компонентов нефти из девонских отложений. Показано, что масла тяжелых нефей характеризуются сходным набором насыщенных углеводородов, но различаются по составу идентифицированных ароматических углеводородов и гетероорганических соединений. Особенностью масел нефти III является более широкий набор моно- и бициклических аренов и кислородсодержащих структур.

### Ключевые слова:

Нефть, асфальтены, смолы, масла, структурно-групповой состав, молекулярный состав.

### Введение

Интенсивная разработка месторождений легких и средних нефей привела к резкому снижению их запасов. В связи с этим проблема дефицита нефтяного сырья решается сегодня за счет освоения нетрадиционных источников углеводородов, в частности тяжелых и сверхтяжелых нефей, на долю которых приходится до 70 % от общих запасов жидких углеводородов [1, 2]. От кондиционных нефей эти нефти отличаются повышенной плотностью и вязкостью и, как правило, высоким содержанием смолисто-асфальтеновых веществ

(САВ) и гетероатомных соединений. Такая особенность состава значительно осложняет переработку тяжелых нефей по существующим базовым технологиям, создаваемым главным образом на основе традиционного углеводородного сырья. В сложившейся ситуации актуальными становятся исследования, направленные на получение и обобщение информации о химической природе и свойствах тяжелых нефей, имеющей значение для разработки инновационных технических решений их рационального использования. В рамках таких исследований особый

интерес представляют работы по изучению состава и структуры молекул САВ и состава масляных компонентов тяжелых нефей. Это связано, в первую очередь, с тем, что смолы и асфальтены считаются важным резервом углубленной переработки нефтяного сырья, а масла – основой для производства товарных нефтепродуктов. Направленность превращений смолисто-асфальтеновых и масляных компонентов в термических и термокатализитических процессах, определяющих глубину переработки тяжелого углеводородного сырья и качество получаемых нефтепродуктов, во многом зависит от их состава и строения [3–8].

В данной работе обсуждаются особенности структуры макромолекул асфальтенов и смол и молекулярного состава масел тяжелых нефей, отобранных из различных нефтегазоносных провинций и различающихся возрастом вмещающих отложений и содержанием САВ и масляных компонентов.

Для характеристики асфальтенов и смол использовали метод структурно-группового анализа (СГА) [9], который в последнее время широко применяется в исследовательской практике для оценки структуры САВ горючих сланцев, нефей, остаточных нефтяных фракций и продуктов превращений нефтяных дисперсных систем в термических и термокатализитических процессах [8, 10–15]. Основу метода составляют результаты интегрирования спектров ПМР тяжелых нефтяных компонентов в сочетании с измеренными значениями средних молекулярных масс анализируемых соединений и данными определения их элементного состава. С помощью СГА можно оценить общие размеры и степень ароматичности молекул смол и асфальтенов, определить число ароматических и нафтеновых колец в их нафеноароматической системе и среднее число атомов углерода в боковых алкильных заместителях.

Анализ масляных компонентов осуществляли методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектором (ГХ-МС).

### Экспериментальная часть

Исследовали асфальтены, смолы и масла тяжелых нефей месторождений Ашальчинское (I,  $\rho=978 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), Усинское (II,  $\rho=972 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) и Нурлатское (III,  $\rho=964 \text{ кг}/\text{м}^3$ ). Нефти отобраны из палеозойского комплекса пермских и девонских отложений Волго-Уральской (I и III) и пермо-карбоновой залежи Тимано-Печорской (II) нефтегазоносных провинций и различаются по содержанию компонентов и гетероатомов. Так в ряду нефей I–II–III возрастает содержание асфальтенов (6,40–7,60–11,09 % мас.) и смол (18,39–19,10–25,04 % мас.) (табл. 1). Максимальными концентрациями серы ( $S=4,70 \text{ \% мас.}$ ) и азота ( $N=0,73 \text{ \% мас.}$ ) характеризуется нефть III. В нефти I содержание этих гетероатомов ниже ( $S=3,89 \text{ и } N=0,67 \text{ \% мас.}$ ). В нефти II наблюдается наименьшее количество серы и азота (1,98 и 0,64 % мас., соответственно), но наибольшее количество кислорода ( $O=3,24$  против 1,51 и 0,33 % мас., соответственно, в нефтях I и III).

Асфальтены (A) выделяли из нефей путем осаждения 40-кратным (по объему) избыtkом н-гексана. Смесь выдерживали в течение 12 часов. Выпавший осадок отделяли фильтрованием, помещали в бумажный картридж и экстрагировали н-гексаном в аппарате Сокслета в течение 16–18 часов для удаления соосажденных смол и углеводородов. Очищенные A вымывали из картриджа толуолом, растворитель отгоняли. Для получения смол (См) и масел (М) деасфальтенизированную нефть разделяли методом колончной жидкостно-адсорбционной хроматографии на активированном силикагеле марки АСК при отношении адсорбента к разделяемому образцу 100 к 1 по массе. Сначала элюировали М смесью н-гексана с бензolem в объемном отношении 7:3, а затем См – смесью этанола с бензolem в объемном отношении 1:1.

Элементный состав образцов определяли на автоматическом анализаторе C, H, S, N «Vario EL Cube». Абсолютная погрешность прибора не превышала  $\pm 0,1 \text{ \%}$  для каждого определяемого элемента. Содержание кислорода оценивали по разности между 100 % и суммой элементов C, H, N, S.

Молекулярные массы (ММ) измеряли методом криоскопии в бензоле.

Спектры  $^1\text{H}$  ЯМР снимали на спектрометре ЯМР-Фурье «AVANCE AV 400» фирмы «Bruker», используя в качестве растворителя  $\text{CDCl}_3$ , а в качестве стандарта – тетраметилсилан. Исходя из площадей сигналов в соответствующих областях полученных спектров, определяли основные параметры распределения водородных атомов в различных структурных фрагментах молекул САВ [16, 17].

Расчет структурно-групповых параметров усредненных молекул исследуемых образцов А и См осуществлен по программе, зарегистрированной в Роспатенте (Федеральная служба России по интеллектуальной собственности) [18]. В ходе проведенных расчетов определены: число атомов углерода в ароматических ( $C_a$ ), нафтеновых ( $C_h$ ) и парафиновых ( $C_n$ ) структурах усредненной молекулы; число структурных блоков в усредненной молекуле ( $m_a$ ), которые представляют собой нафеноароматические образования, обрамленные алкильными заместителями; общее число ( $K_o^*$ ), число ароматических ( $K_a^*$ ) и нафтеновых ( $K_h^*$ ) циклов в структурном блоке; общее число ( $C^*$ ) и число атомов углерода в парафиновых фрагментах ( $C_n^*$ ) структурного блока; количество атомов углерода, находящихся в  $\alpha$ -положении к ароматическим ядрам ( $C_a^*$ ) и количество атомов углерода в не связанных с ароматическими ядрами терминальных метильных группах ( $C_j^*$ ).

ГХ-МС анализ выполнен на приборе DFS (*Thermo Scientific*). Условия получения спектров приведены в работе [19]. Реконструкцию молекулярно-массового разделения (масс-хроматограмм) различных типов соединений проводили с использованием характеристических ионов на основе хроматограмм по полному ионному току с помощью программы *Xcalibur*. Для идентификации индивидуальных соединений использовали литературные данные и компьютерную библиотеку масс-спектров Национального института стандартов и технологий (*NIST*).

## Результаты и их обсуждение

### Асфальтены

Как следует из данных табл. 1, содержание А в ряду тяжелых нефей I–II–III возрастает. При этом снижается ММ усредненных молекул А и становятся меньше их общие размеры (С). Наблюдаемые изменения обусловлены уменьшением числа атомов углерода в ароматических ( $C_a$ ) и нафтеновых ( $C_n$ ) структурных фрагментах усредненных молекул и, как следствие, снижением их общей цикличности за счет снижения как ароматических ( $K_a$ ), так и нафтеновых колец ( $K_n$ ) (табл. 1). По числу атомов С в парафиновых фрагментах выделяется усредненная молекула А нефти III. Количество углеродных атомов в ее алкильных заместителях почти в три раза больше, чем количество таких атомов в структуре усредненных молекул А нефей I и II.

По расчетным данным исследуемые асфальтеновые компоненты всех нефей состоят преимущественно из трехблочных молекул ( $m_a=3,35, 2,93$  и  $2,61$  для нефти I, II и III, соответственно) (табл. 1). При этом в составе А нефти I присутствует 35 % молекул, имеющих четырехблочное строение, а в составе А нефти III – 39 % молекул, имеющих двухблочное строение. Структурные блоки усредненных молекул всех образцов А близки по общим размерам ( $C^*$ ), но различаются по кольцевому составу нафеноароматической системы и числу атомов углерода в алкильных заместителях. При практически равном количестве ароматических циклов ( $K_a^*=3,37, 3,24$  и  $3,07$ ) количество нафтеновых циклов в полициклических образованиях структурных блоков А в ряду нефей I–II–III снижается ( $K_n^*=6,02, 5,45$  и  $3,47$ ), а число углеродных атомов в парафиновых фрагментах увеличивается ( $C_n^*=1,59, 1,69$  и  $5,32$ ).

С ароматическим ядром в структурных блоках усредненных молекул А всех нефей соединено более четырех алифатических атомов углерода ( $C_a^*=5,57, 5,02$  и  $4,84$ ), что предполагает его внутреннее расположение в нафеноароматической системе [20].

Что касается распределения парафиновых атомов углерода, то в алкильных фрагментах структурных блоков А нефти I и II они содержатся практически в равных количествах ( $C_n^*=1,59$  и  $1,69$  для А нефти I и II, соответственно) и входят в состав только метильных заместителей ( $C_y^*=C_n^*$ ). Содержание атомов углерода в парафиновых фрагментах структурного блока А нефти III в три раза превышает их содержание в алкильных заместителях структурных блоков А нефти I и II. При этом на долю метильных групп в их составе приходится лишь треть парафиновых атомов С ( $C_y^*/C_n^* \cdot 100 = 34\%$ ).

Из сопоставления вышеприведенных данных следует, что структурные блоки усредненных молекул А нефти I и II близки по общей цикличности ( $K_o^*=9,39$  и  $8,69$ ) и их нафеноароматическая система более развита по сравнению с нафеноароматической системой структурного блока усредненной молекулы А нефти III ( $K_o^*=6,54$ ). В то же время структурный блок усредненной молекулы А нефти III имеет более раз-

витое алкильное обрамление ( $C_n^*=5,32$  против  $1,59$  и  $1,69$ ).

**Таблица 1.** Физико-химические характеристики и средние структурные параметры смолисто-асфальтеновых компонентов тяжелых нефей

**Table 1.** Physicochemical characteristics and average structural parameters of resin-asphaltene components of heavy oils

Показатели Indicators	Нефть I Oil I		Нефть II Oil II		Нефть III Oil III	
	A/A	Cm/R	A/A	Cm/R	A/A	Cm/R
Массовая доля Mass fraction, %	6,40	18,39	7,60	19,10	11,09	25,04
ММ, а.е.м./MW, а.м.у.	1655	866	1405	877	1226	680
Элементный состав, % мас. /Elemental composition, wt. %						
C	80,51	79,89	80,03	81,14	79,56	77,76
H	6,98	9,20	6,99	9,35	7,81	9,80
N	1,52	1,14	1,41	1,08	1,65	0,90
S	5,41	5,46	3,77	2,51	7,38	6,05
O	5,58	4,31	7,80	5,37	3,60	5,49
Число атомов в усредненной молекуле Number of atoms in a mean molecule						
C	111,04	57,81	93,70	59,30	81,28	44,06
H	114,6	77,75	97,43	82,22	98,88	66,11
N	1,80	0,71	1,42	0,68	1,44	0,44
S	2,80	1,48	1,66	0,81	2,84	1,29
O	5,77	2,30	6,85	2,94	2,50	2,33
Число атомов С различного типа в усредненной молекуле Number of C atoms of various types in a mean molecule						
C <sub>a</sub>	43,56	18,13	37,15	17,27	30,65	11,84
C <sub>n</sub>	62,14	23,34	51,60	22,66	36,75	9,73
C <sub>h</sub>	5,34	16,34	4,96	19,37	13,88	22,50
C <sub>o</sub>	18,66	8,82	14,72	8,15	12,63	6,19
C <sub>y</sub>	5,34	4,49	4,96	4,62	4,77	4,02
Число колец в усредненной молекуле Number of rings in a mean molecule						
K <sub>o</sub>	31,48	10,27	25,48	9,75	17,04	5,42
K <sub>a</sub>	11,29	4,52	9,51	4,21	8,00	2,95
K <sub>n</sub>	20,19	5,76	15,97	5,54	9,04	2,47
Число структурных блоков в усредненной молекуле Number of structural blocks in a mean molecule						
m <sub>a</sub>	3,35	1,86	2,93	1,79	2,61	1,49
Параметры среднего структурного блока Parameters of medium structural block						
K <sub>o</sub> <sup>*</sup>	9,39	5,53	8,69	5,46	6,54	3,64
K <sub>a</sub> <sup>*</sup>	3,37	2,43	3,24	2,36	3,07	1,98
K <sub>n</sub> <sup>*</sup>	6,02	3,10	5,45	3,10	3,47	1,66
C <sup>*</sup>	33,13	31,10	31,96	33,19	31,17	29,57
C <sub>h</sub> <sup>*</sup>	1,59	8,79	1,69	10,84	5,32	15,10
C <sub>a</sub> <sup>*</sup>	5,57	4,75	5,02	4,56	4,84	4,16
C <sub>y</sub> <sup>*</sup>	1,59	2,42	1,69	2,59	1,83	2,70
N <sup>*</sup>	0,54	0,38	0,48	0,38	0,55	0,30
S <sup>*</sup>	0,84	0,80	0,57	0,45	1,09	0,87
O <sup>*</sup>	1,72	1,24	2,34	1,64	0,96	1,56

Следует отметить, что структурные блоки усредненных молекул исследуемых А близки по содержанию азота, но различаются по содержанию серы и кислорода. На долю азотсодержащих структурных блоков приходится 48–55 % от общего числа блоков в усредненных молекулах А. Серой богаче структурные блоки А нефти III, а кислородом – структурные блоки А нефти II. При этом каждый структурный блок усредненной молекулы А нефти III содержит один атом серы, а 34 % структурных блоков усредненной молекулы А нефти II могут содержать по три атома кислорода.

### Смолы

Наблюдаемые для См тяжелых нефей I, II и III изменения содержания, средних значений ММ и общих размеров усредненных молекул аналогичны изменению этих характеристик для асфальтеновых компонентов (табл. 1). При близких значениях этих параметров для См нефей I и II, для См нефти III характерно самое высокое их содержание, наименьшее значение средней ММ и наименьшие размеры усредненной молекулы (С).

Как следует из табл. 1, углеродный скелет смолистых компонентов нефей I и II имеет достаточно развитую циклическую структуру усредненных молекул ( $K_o=10,27$  и  $9,75$ ), состоящую из четырех-пяти ароматических ( $K_a=4,52$  и  $4,21$ ) и пяти-шести нафтеновых колец ( $K_h=5,76$  и  $5,54$ ). В алкильном обрамлении таких усредненных молекул находится  $16,34$  и  $19,37$  углеродных атомов ( $C_n$ ) соответственно. Состоит См нефть I и II преимущественно из двублочных молекул ( $m_a=1,86$  и  $1,76$ ). Согласно расчетным данным, в каждом их структурном блоке сконденсировано по два ароматических ( $K_a^*=2,43$  и  $2,36$ ) и три нафтеновых ( $K_h^*=3,10$  и  $3,10$ ) кольца. Значения  $C_a^*$ , превышающие 4 ( $C_a^*=4,75$  и  $4,56$ ), могут свидетельствовать о том, что полиареновое ядро располагается внутри гибридной нафтонафтеновой системы структурных блоков См нефей I и II. В алкильных заместителях этих структурных блоков содержится до десяти атомов углерода ( $C_n^*=8,79$  и  $10,84$ ). При этом значения  $C_y^*=2,42$  и  $2,59$  составляют незначительную долю (28 и 24 %) от  $C_n$ , что указывает на линейный или слаборазветвленный характер преобладающей части алкильных цепей, находящихся в структурных блоках См нефей I и II.

Усредненная молекула См нефти III менее циклическа. Она состоит только из пяти-шести колец ( $K_o=5,42$ ), среди которых преимущественно три бензольные ( $K_a=2,95$ ) и два, реже три, насыщенные ( $K_h=2,47$ ). Такая нафтонафтеновая система имеет в своем окружении  $22,50$  алкильных углеродных атомов ( $C_n$ ). Особенностью усредненной молекулы См нефти III является меньшее количество структурных блоков ( $m_a=1,49$ ) и их меньшие размеры. Структурный блок См нефти III представлен тетрациклическим нафтонафтеновым образованием ( $K_o^*=3,64$ ), в котором сочетаются преимущественно два ароматических ( $K_a^*=1,98$ ) и один или два ( $K_h^*=1,66$ ) нафтеновых цикла. Значение  $C_a^*$ , близкое к 4 (4,16), свидетельствует о том, что в случае наличия двух насыщенных колец ароматическое ядро размещается в центре нафтонафтеновой системы [20]. На каждый структурный блок См нефти III приходится в среднем пятнадцать парафиновых атомов углерода ( $C_n^*=15,10$ ). Большая их часть входит в состав длинных алкильных заместителей, имеющих линейное или слаборазветвленное строение ( $C_y^*=2,70$ ).

Распределение гетероатомов по структурным блокам усредненных молекул исследуемых См аналогично их распределению по структурным блокам усредненных молекул А. Так, по распределению азота структурные блоки См различаются незначительно.

Доля азотсодержащих структурных блоков в них составляет 30–38 %. Серусодержащими структурными блоками богаче усредненная молекула См нефти III, а кислородсодержащими – структурные блоки усредненной молекулы См нефти II. Атом серы содержит 87 % структурных блоков См нефти III, а 64 % структурных блоков См нефти II содержат по два атома кислорода. Структурные блоки См нефти I близки к структурным блокам См нефти III по содержанию серы, а структурные блоки См нефти III близки к структурным блокам См нефти II по содержанию кислорода.

### Масла

По данным ГХ-МС анализа, в составе М тяжелых нефей I, II и III присутствуют алканы, нафтены, ароматические углеводороды (АУ) и гетероорганические соединения (ГОС).

Насыщенные УВ изученных образцов представлены н-алканами ( $m/z 71$ ), н-алкилцикlopентанами ( $m/z 68$ ), н-алкилциклогексанами ( $m/z 82$ ), три-, тетра- и пентациклическими терпанами ( $C_{23}$ – $C_{29}$  хейлантанами,  $C_{24}$  тетрациклическим терпаном,  $C_{27}$ – $C_{35}$  гопанами,  $m/z 191$ ) и  $C_{27}$ – $C_{29}$  стеранами ( $m/z 217$ ). Для н-алканов и моноциклических нафтенов масляных компонентов нефти III наблюдается тенденция к увеличению в их составе доли высокомолекулярных гомологов. В качестве примера на рисунке приведено молекулярно-массовое распределение н-алканов в изученных маслах.

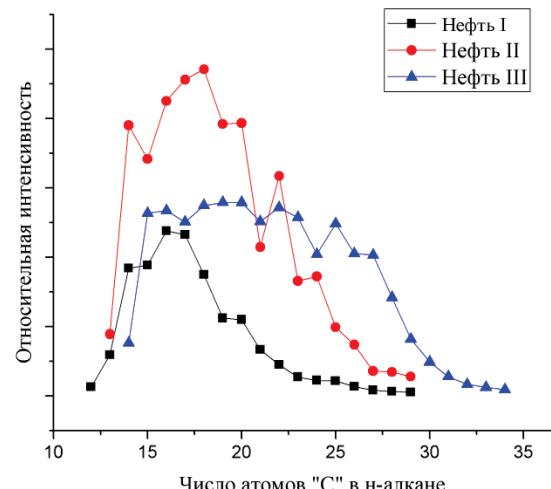


Рисунок. Молекулярно-массовое распределение н-алканов в маслах тяжелых нефей месторождений: Ашальчинское (I), Усинское (II) и Нурлатское (III)

Figure. Molecular weight distribution of n-alkanes in oil components of heavy oils sampled in the Ashalchinskoe (I), Usinskoe (II), and Nurlatskoe (III) oilfields

По набору идентифицированных АУ и ГОС масляные компоненты нефей I–III существенно различаются (табл. 2, 3). Так, при наличии во всех образцах алкилтриметилбензолов, дифенилов, нафталинов, фенантренов и флуоренов, АУ масел нефти III характеризуются более широким набором моно- и бициклических аренов (н-алкил- и н-алкилметилбензолов, триметил- и тетраметил(фенилалкил)бензолов), а АУ

масел нефти II присутствием в их составе фенилзамещенных структур (фенилнафтилинов и терфенилов)

и тетра- и пентациклических соединений (хризенов, бензо[с]флуоренов, периленов) (табл. 2).

**Таблица 2. Состав ароматических углеводородов в маслах тяжелых нефтей**

**Table 2. Composition of aromatic hydrocarbons in oil components of heavy oils**

Общая формула, m/z General formula, m/z	Соединения Compounds	Нефть I Oil I	Нефть II Oil II	Нефть III Oil III
Моноциклические ароматические углеводороды/Monocyclic aromatic hydrocarbons				
$C_nH_{2n-6}$ , 92	н-алкилбензолы/n-alkylbenzenes	н.о./н.и.*	н.о./н.и.	$C_{14}-C_{28}$
$C_nH_{2n-6}$ , 105	н-алкилметилбензолы/n-alkylmethylbenzenes	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{14}-C_{30}$
$C_nH_{2n-6}$ , 119	н-алкилдиметилбензолы/n-alkyldimethylbenzenes	$C_{17}-C_{21}$	н.о./н.и.	$C_{14}-C_{28}$
$C_nH_{2n-6}$ , 133	н-алкилтриметилбензолы/n-alkyltrimethylbenzenes	$C_{13}-C_{26}$	$C_{11}-C_{25}$	$C_{13}-C_{26}$
Бициклические ароматические углеводороды/Bicyclic aromatic hydrocarbons				
$C_nH_{2n-12}$ , 128+14n	нафталины/naphthalenes	$C_0-C_4$	$C_0-C_4$	$C_2-C_4$
$C_nH_{2n-14}$ , 133	триметил(фенилалкил)бензолы trimethyl(phenylalkyl)benzenes	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{18}-C_{25}$
$C_nH_{2n-14}$ , 147	тетраметил(фенилалкил)бензолы tetramethyl(phenylalkyl)benzenes	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{20}-C_{22}$ , $C_{25}$
$C_nH_{2n-14}$ , 154+14n	дифенилы/biphenyls	$C_0-C_4$	$C_0-C_4$	$C_0-C_1$
Трициклические ароматические углеводороды/Tricyclic aromatic hydrocarbons				
$C_nH_{2n-18}$ , 178+14n	фенантрены/phenanthrenes	$C_0-C_4$	$C_0-C_4$	$C_0-C_3$
$C_nH_{2n-16}$ , 166+14n	флуорены/fluorennes	$C_0-C_1$	$C_0-C_1$	$C_1$
$C_nH_{2n-20}$ , 204+14n	фенилнафтилины/phenylnaphthalenes	н.о./н.и.	$C_0-C_3$	н.о./н.и.
$C_nH_{2n-22}$ , 230	терфенилы/terphenyls	н.о./н.и.	$C_0$	н.о./н.и.
Тетрациклические ароматические углеводороды/Tetracyclic aromatic hydrocarbons				
$C_nH_{2n-24}$ , 228+14n	хризены/chrysenes	н.о./н.и.	$C_0-C_2$	н.о./н.и.
$C_nH_{2n-22}$ , 216	бензо[с]флуорен/benzof[с]fluorene	н.о./н.и.	$C_0$	н.о./н.и.
Пентациклические ароматические углеводороды/Pentacyclic aromatic hydrocarbons				
$C_nH_{2n-28}$ , 252+14n	перилены/perylenes	н.о./н.и.	$C_0-C_2$	н.о./н.и.

\*н.о. – здесь и далее не обнаружены/\*n.i. – here and further not identified.

**Таблица 3. Состав гетероорганических соединений в маслах тяжелых нефтей**

**Table 3. Composition of heteroorganic compounds in oil components of heavy oils**

Общая формула, m/z General formula, m/z	Соединения/Compounds	Нефть I Oil I	Нефть II Oil II	Нефть III Oil III
Серусодержащие соединения/Sulfur compounds				
$C_nH_{2n-2}S$ , 183	бициклические терпеноидные сульфиды bicyclic terpenoid sulfides	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{12}-C_{20}$
$C_nH_{2n-10}S$ , 162+14n	бензотиофены/benzothiophenes	$C_2-C_4$	$C_2-C_4$	$C_2-C_5$
$C_nH_{2n-16}S$ , 184+14n	дibenзотиофены/dibenzothiophenes	$C_0-C_4$	$C_0-C_4$	$C_0-C_4$
$C_nH_{2n-22}S$ , 234+14n	нафтобензотиофены/naphthobenzothiophenes	$C_0-C_1$	$C_0-C_2$	$C_0-C_1$
Азотсодержащие соединения/Nitrogen compounds				
$C_nH_{2n-15}N$ , 167+14n	карбазолы/carbazoles	н.о./н.и.	$C_0-C_5$	н.о./н.и.
$C_nH_{2n-21}N$ , 231+14n	бензокарбазолы/benzocarbazoles	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_1-C_6$
$C_{18}H_{21}N$ , 251	7-метил-1,2,3,4,8,9,10,11-октагидробензо[с]акридин 7-methyl-1,2,3,4,8,9,10,11-octahydrobenzo[с]acridine	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_1$
Кислородсодержащие соединения/Oxygen compounds				
$C_nH_{2n}O$ , 58	н-алкан-2-оны/n-alkan-2-ones	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{10}-C_{23}$
$C_nH_{2n}O$ , 72	н-алкан-3-оны/n-alkan-3-ones	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{11}-C_{22}$
$C_nH_{2n}O$ , 86	н-алкан-4-оны/n-alkan-4-ones	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{12}-C_{17}$
$C_nH_{2n}O$ , 85	н-алкан-5-оны/n-alkan-5-ones	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{12}-C_{17}$
$C_nH_{2n}O$ , 99	н-алкан-6-оны/n-alkan-6-ones	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{14}-C_{17}$
$C_nH_{2n}O$ , 113	н-алкан-7-оны/n-alkan-7-ones	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{14}-C_{17}$
$C_{18}H_{36}O$ , 268	6,10,14- trimethyl-2-пентадеканон 6,10,14-trimethyl-2-pentadecanone	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_{18}$
$C_nH_{2n-16}$ , 182+14n	бензофеноны/benzophenones	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_0-C_2$
$C_nH_{2n-18}O$ , 180+14n	Флуорен-9-оны/fluoren-9-ones	н.о./н.и.	$C_0-C_1$	$C_0-C_1$
$C_nH_{2n-16}$ , 168+14n	дibenзофураны/dibenzofurans	н.о./н.и.	$C_0-C_2$	$C_0-C_1$
$C_nH_{2n-24}$ , 244+14n	фенилдibenзофураны/phenyldibenzofurans	н.о./н.и.	н.о./н.и.	$C_0-C_1$

Что касается ГОС, то во всех исследуемых маслах они представлены ароматическими сернистыми соединениями – бензо-, дibenзо- и нафтобензотиофенами (табл. 3). В маслах нефти II дополнительно идентифицированы карбазолы, флуореноны и дibenзофураны, в маслах нефти III – бициклические терпеноидные сульфиды, бензокарбазолы, октагидробензо-

акридин, алканоны нормального строения с различным положением функциональной группы и гомолог состава  $C_{18}$  с углеродным скелетом изопреноидного строения, флуореноны, бензофеноны, дibenзофураны и фенилдibenзофураны.

Выявленные различия в составе масляных компонентов тяжелых нефтей могут быть связаны как с

глубиной катагенных превращений нефтяных систем, так и с природой исходного нефтематеринского вещества.

### Заключение

Проведено сравнительное изучение структуры смолисто-асфальтеновых веществ и молекулярного состава масел тяжелых палеозойских нефей Ашальчинского, Усинского и Нурлатского месторождений Волго-Уральской и Тимано-Печорской нефтегазоносных провинций, различающихся возрастом вмещающих отложений (пермь, пермо-карбон и девон, соответственно), содержанием компонентов и гетероатомов.

Показано, что при переходе от пермских к девонским отложениям средняя молекулярная масса асфальтенов и смол снижается, меньше становятся и общие размеры их усредненных молекул. Это связано со снижением в их составе количества структурных блоков, которые становятся более компактными за счет снижения общего числа колец в нафтоароматической системе, главным образом нафтеновых. При этом возрастает число атомов углерода в парафиновых фрагментах структурных блоков их усредненных молекул. Наиболее ярко изменения структурных параметров молекул проявляются для смолисто-асфальтеновых компонентов нефти из девонских отложений. Значительные количества гетероатомов в составе структурных блоков усредненных молекул асфальтенов и смол указывают на то, что гетероароматические ядра играют важную роль в формировании смолисто-асфальтеновых компонентов тяжелых нефей. Количественные значения всех структурных параметров молекул асфальтенов и смол согласуются с установленными ранее для высокомолекулярных соединений палеозойских нефей других нефтегазоносных провинций [20, 21].

Исследованные масла характеризуются сходным набором насыщенных углеводородов (н-алканов,mono- и полициклоалканов), но отличаются по составу

идентифицированных ароматических углеводородов и гетероорганических соединений. Особенностью ароматических углеводородов масел нефти из пермо-карбоновой залежи является присутствие в их составе фенилзамещенных, тетра- и пентациклических структур, а особенностью ароматических углеводородов масел нефти из девонских отложений – более широкого набораmono- и бициклических аренов. При наличии в маслах всех палеозойских нефей ароматических сернистых соединений (бензо-, дibenzo- и нафтобензотиофенов) в маслах нефти из пермо-карбоновых отложений дополнительно идентифицированы карбазолы, флуореноны и дibenзофураны, а в маслах нефти из отложений девона – бициклические терпеноидные сульфины, бензокарбазолы, октагидробензоакридин, алканоны нормального строения с различным положением функциональной группы и гомолог состава  $C_{18}$  с углеродным скелетом изопреноидного строения, флуореноны, бензофеноны, дibenзофураны и фенилдibenзофураны.

Результаты проведенного исследования указывают на важную роль природы исходного нефтематеринского вещества и катагенных превращений нефтяных систем в формировании состава и структуры нефтяных компонентов.

Полученные данные могут быть использованы при создании новых технических решений их переработки и прогнозировании качества нефтепродуктов.

*Авторы выражают благодарность канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории природных превращений нефти ИХН СО РАН Кадычагову Петру Борисовичу за регистрацию хроматомасс-спектров, вед. инженеру лаборатории физико-химических методов исследования ИХН СО РАН Томсон Галине Александровне за определение элементного состава образцов.*

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКР 121031200185-6).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effectiveness of different transition metal dispersed catalysts for in situ heavy oil upgrading / A. Al-Marshed, A. Hart, G. Leeke, M. Greaves, J. Wood // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2015. – V. 54. – P. 10645–10655.
2. Integrated process for partial oxidation of heavy oil and in-situ reduction of red mud / D. Wang, Y. Li, L. Jin, K. Hao, B. Wei, D. Yao, H. Hu // Applied Catalysis B: Environmental. – 2019. – V. 258. – № 5. – 117944.
3. Ancheyta H. Modeling of processes and reactors for upgrading of heavy petroleum. – Boca-Raton: CRC Press, 2013. – 524 p.
4. Inductive effect of basic nitrogen compounds on coke formation during the catalytic cracking process / X.B. Chen, T. Li, L. Xin, Y.Q. Yang, H.H. Shan, C.H. Yang // Catalysis Communications. – 2016. – V. 74. – P. 95–98.
5. Thermal cracking and catalytic hydrocracking of a Colombian vacuum residue and its maltenes and asphaltenes fractions in toluene / A.Y. Leon, A. Guzman, D. Laverde, R.V. Chaudhari, B. Subramaniam, J.J. Bravo-Suarez // Energy & Fuels. – 2017. – V. 31. – № 4. – P. 3868–3877.
6. Hydroconversion behavior of asphaltenes under liquid-phase hydrogenation conditions / N. Jin, G. Wang, S. Han, Y. Meng, C. Xu, J. Gao // Energy & Fuels. – 2016. – V. 30. – № 4. – P. 2594–2603.
7. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. Heavy crude oil upgrading using nanoparticles by applying electromagnetic technique // Fuel. – 2018. – V. 232. – P. 704–711.
8. Корнеев Д.С., Певнева Г.С., Воронецкая Н.Г. Влияние состава и молекулярной структуры асфальтенов тяжелых нефей на их реакционную способность в термодеструктивных процессах // Нефтехимия. – 2021. – Т. 61. – № 2. – С. 172–183.
9. Камынин В.Ф., Большаков Г.Ф. Определение структурных параметров при структурно-групповом анализе компонентов нефти // Нефтехимия. – 1984. – Т. 24. – № 4. – С. 450–459.
10. Копытов М.А., Головко А.К. Изменения структурно-групповых характеристик смол и асфальтенов тяжелых нефей в процессе первичной переработки // Нефтехимия. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 41–48.
11. Влияние асфальтенов на направленность термических превращений углеводородов тяжелой нефти / Н.Г. Воронецкая, Г.С. Певнева, Д.С. Корнеев, А.К. Головко // Нефтехимия. – 2020. – Т. 60. – № 2. – С. 183–191.
12. Structural group characteristics of resins and asphaltenes of high-sulfur natural asphaltite and products of its conversion in supercritical water / V.R. Antipenko, O.N. Fedyayeva, A.A. Vostrikov, A.A. Grin'ko // Petroleum Chemistry. – 2020. – V. 60. – № 6. – P. 668–674.

13. Свириденко Н.Н., Кривцов Е.Б., Головко А.К. Изменение структуры молекул смол и асфальтенов природного битума в процессе термокрекинга // Химия в интересах устойчивого развития. – 2018. – Т. 26. – № 2. – С. 193–201.
14. Головко А.К., Гринько А.А. Структурные превращения нефтяных смол и их фракций при термолизе // Нефтехимия. – 2018. – Т. 58. – № 4. – С. 391–398.
15. Resins and asphaltenes of light and heavy oils: their composition and structure / T.V. Cheshkova, V.P. Sergun, E.Y. Kovalenko, N.N. Gerasimova, T.A. Sagachenko, R.S. Min // Energy & Fuels. – 2019. – V. 33. – № 9. – P. 7971–7982.
16. Fergoug T., Bouhadda Y. Determination of Hassi Messaoud Asphaltene Aromatic Structure from  $^1\text{H}$  &  $^{13}\text{C}$  NMR Analysis // Fuel. – 2014. – V. 115. – № 1. – P. 521–526.
17. Molecular structure and solubility determination of asphaltenes / S. Ok, M. Mahmoodinia, N. Rajasekaran, M.A. Sabti, A. Lervik, T.S. van Erp, R. Cabriolu // Energy & Fuels. – 2019. – V. 33. – № 9. – P. 8259–8270.
18. Дмитриев Д.Е., Головко А.К. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ QMR № 2010612415 от 06.04.10 г.
19. Characteristics of products of thermal decomposition of heavy oil asphaltenes under supercritical conditions / E.Y. Kovalenko, N.N. Gerasimova, T.A. Sagachenko, R.S. Min, Y.F. Patrakov // Energy & Fuels. – 2020. – V. 34. – № 8. – P. 9563–9572.
20. Головко А.К., Камыянов В.Ф., Огородников В.Д. Высокомолекулярные гетероатомные компоненты нефей Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 12. – С. 1786–1795.
21. Головко А.К., Горбунова Л.В., Камыянов В.Ф. Закономерности в структурно-групповом составе высокомолекулярных гетероатомных компонентов нефей // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 3. – С. 364–374.

Поступила 15.06.2022 г.

#### Информация об авторах

**Герасимова Н.Н.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти, Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Чешкова Т.В.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти, Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Коваленко Е.Ю.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти, Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Сагаченко Т.А.**, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти, Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Мин Р.С.**, доктор химических наук, заведующая лабораторией гетероорганических соединений нефти, Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Огородников В.Д.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических методов исследования, Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 665.613:665.6.033.28

## COMPOSITION OF RESIN-ASPHALTENE AND OIL COMPONENTS OF HEAVY OILS

**Natalia N. Gerasimova<sup>1</sup>,**  
dm@ipc.tsc.ru

**Tatyana V. Cheshkova<sup>1</sup>,**  
chtv12@mail.ru

**Elena Yu. Kovalenko<sup>1</sup>,**  
kovalenko@ipc.tsc.ru

**Tatyana A. Sagachenko<sup>1</sup>,**  
dissovet@ipc.tsc.ru

**Raisa S. Min<sup>1</sup>,**  
lgosn@ipc.tsc.ru

**Vladimir D. Ogorodnikov<sup>1</sup>,**  
ovod@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634055, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need to expand the amount of data on resin-asphaltene substances and oil components of heavy oils, which share in the volume of the extracted and processed hydrocarbon raw materials is steadily growing. The refining of oils with high content of asphaltenes, resins, and heteroatomic compounds using existing basic technologies is hard and costly. Hence, information on the composition and structure of the heavy oil components is of great importance for the development of innovative technical solutions of their rational use. This is due, first of all, to the fact that resins and asphaltenes are considered the important reserve for the advanced processing of crude oil, while oil components are considered the basis for the production of commercial petroleum products.

**The purpose** of the work is to study the structural-group composition of asphaltene and resin macromolecules and the molecular composition of oil components of heavy oils sampled in various oil and gas provinces and differing in the age of the enclosing deposits and the content of resin-asphaltene and oil components.

**Methods:** liquid adsorption chromatography, elemental analysis, cryoscopy in benzene, <sup>1</sup>H NMR spectroscopy, structural group analysis, combined gas chromatography mass-spectrometry.

**Results.** A comparative description of the composition and structure of macromolecules of resin-asphaltene substances and the molecular composition of oil components of heavy oils from the Ashalchinskoe (I), Usinskoe (II) and Nurlatskoe (III) fields is given. These oils differ in the content of these components and heteroatoms and in the age of the enclosing deposits (Permian, Permian–Carboniferous, and Devonian). It has been found out that the content of asphaltenes and resins increases in the series of heavy oils I–II–III. At the same time, their average molecular weight decreases and the overall sizes of their mean molecules become smaller. This is due to a decrease in the number of structural blocks, which become more compact because of decreasing total number of rings in the naphthenoaromatic system, mainly naphthenic ones. In this case, the number of carbon atoms in the paraffin fragments of the structural blocks of mean molecules increases. The observable changes in the structural parameters of molecules are most pronounced for the resin-asphaltene components of oil from Devonian deposits. It is shown that oil components of heavy oils are characterized by a similar set of saturated hydrocarbons, but differ in the composition of identified aromatic hydrocarbons and heteroorganic compounds. A feature of oil components in the oil III is a wider range of mono- and bicyclic arenes and oxygen-containing structures.

### Key words:

Oil, asphaltenes, resins, oils, structural group composition, molecular composition.

The authors acknowledge Petr B. Kadychagov, Cand. Sc., senior researcher, oil natural conversion laboratory IPCh SB RAS, for recording chromatography mass-spectrum, Galina A. Tomson, chief engineer of the laboratory of physical-chemical research methods IPCh SB RAS, for determining elemental composition of samples.

The research was carried out within the State assignment of the IPCh SB RAS funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (NIOKTR 121031200185-6).

### REFERENCES

1. Al-Marshed A., Hart A., Leeke G., Greaves M., Wood J. Effectiveness of Different Transition Metal Dispersed Catalysts for in situ Heavy Oil Upgrading. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, vol. 54, pp. 10645–10655.
2. Wang D., Li Y., Jin L., Hao K., Wei B., Yao D.H. Hu Integrated process for partial oxidation of heavy oil and in-situ reduction of red mud. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, vol. 258, no. 5, 117944.
3. Ancheyta H. *Modeling of processes and reactors for upgrading of heavy petroleum*. Boca-Raton, CRC Press, 2013. 524 p.
4. Chen X.B., Li T., Xin L., Yang Y.Q., Shan H.H., Yang C.H. Inductive effect of basic nitrogen compounds on coke formation during the catalytic cracking process. *Catalysis Communications*, 2016, vol. 74, pp. 95–98.
5. Leon A.Y., Guzman A., Laverde D., Chaudhari R.V., Subramanian B., Bravo-Suarez J.J. Thermal cracking and catalytic hydrocracking of a Colombian vacuum residue and its maltenes and

- asphaltenes fractions in toluene. *Energy & Fuels*, 2017, vol. 31, no. 4, pp. 3868–3877.
6. Jin N., Wang G., Han S., Meng Y., Xu C., Gao J. Hydroconversion behavior of asphaltenes under liquid-phase hydrogenation conditions. *Energy & Fuels*, 2016, vol. 30, no. 4, pp. 2594–2603.
  7. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. Heavy Crude Oil Upgrading Using Nanoparticles by Applying Electromagnetic Technique. *Fuel*, 2018, vol. 232, pp. 704–711.
  8. Korneev D.S., Pevneva G.S., Voronetskaya N.G. Effects of the composition and molecular structure of heavy oil asphaltenes on their reactivity in thermal decomposition processes. *Petroleum Chemistry*, 2021, vol. 61, no. 2, pp. 152–161.
  9. Kam'yanov V.F., Bol'shakov G.F. Determination of structural parameters in the structural and group analysis of oil components. *Petroleum Chemistry*, 1984, vol. 24, no. 4, pp. 450–459. In Rus.
  10. Kopytov M.A., Golovko A.K. Changes in structural-group characteristics of resins and asphaltenes of heavy oils in the primary distillation process. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 39–47.
  11. Voronetskaya N.G., Pevneva G.S., Korneev D.S., Golovko A.K. Influence of asphaltenes on the direction of thermal transformation of heavy oil hydrocarbons. *Petroleum Chemistry*, 2020, vol. 60, no. 2, pp. 166–173.
  12. Antipenko V.R., Fedyayeva O.N., Vostrikov A.A., Grin'ko A.A. Structural group characteristics of resins and asphaltenes of high-sulfur natural asphaltite and products of its conversion in supercritical water. *Petroleum Chemistry*, 2020, vol. 60, no. 6, pp. 668–674.
  13. Sviridenko N.N., Krivtsov Ye.B., Golovko A.K. Changes in the Molecular Structure of Resins and Asphaltenes of Natural Bitumen during Thermal Cracking. *Chemistry for Sustainable Development*, 2018, vol. 26, no. 2, pp. 179–186. In Rus.
  14. Golovko A.K., Grin'ko A.A. Structural transformations of petroleum resins and their fractions by thermolysis. *Petroleum Chemistry*, 2018, vol. 58, no. 8, pp. 599–606.
  15. Cheshkova T.V., Sergun V.P., Kovalenko E.Y., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Min R.S. Resins and asphaltenes of light and heavy oils: their composition and structure. *Energy & Fuels*, 2019, vol. 33, no. 9, pp. 7971–7982.
  16. Fergoug T., Bouhadda Y. Determination of Hassi Messaoud asphaltene aromatic structure from  $^1\text{H}$  &  $^{13}\text{C}$  NMR analysis. *Fuel*, 2014, vol. 115, no. 1, pp. 521–526.
  17. Ok S., Mahmoodinia M., Rajasankaran N., Sabti M.A., Lervik A., van Erp T.S., Cabriolu R. Molecular Structure and Solubility Determination of Asphaltenes. *Energy & Fuels*, 2019, vol. 33, no. 9, pp. 8259–8270.
  18. Dmitriev D.E., Golovko A.K. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM QMR* [Certificate of state registration of the QMR computer program]. № 2010612415 from 06.04.10.
  19. Kovalenko E.Y., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Min R.S., Patrakov Y.F. Characteristics of products of thermal decomposition of heavy oil asphaltenes under supercritical conditions. *Energy & Fuels*, 2020, vol. 34, no. 8, pp. 9563–9572.
  20. Golovko A.K., Kam'yanov V.F., Ogorodnikov V.D. High-molecular heteroatomic components of crude oils of the Timan-Pechora petroliferous basin. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, Iss. 12, pp. 1374–1381.
  21. Golovko A.K., Gorbunova L.V., Kam'yanov V.F. Regularities in the structural and group composition of high-molecular heteroatomic components of oils. *Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 3, pp. 364–374. In Rus.

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

**Natalia N. Gerasimova**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Tatyana V. Cheshkova**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Elena Yu. Kovalenko**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Tamyana A. Sagachenko**, Dr. Sc., chief researcher, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Raisa S. Min**, Dr. Sc., head of the Laboratory of Heteroorganic Petroleum Compounds, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Vladimir D. Ogorodnikov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 532.546

## МЕТОДИКА ПОДБОРА РЕЖИМА РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОЙ ЗАЛЕЖИ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кряжев Всеволод Александрович<sup>1</sup>,  
kryazhev\_seva@mail.ru

Кряжев Ярослав Александрович<sup>1</sup>,  
kryazhev\_yar@mail.ru

Гильманов Александр Янович<sup>1</sup>,  
a.y.gilmanov@utmn.ru

Шевелев Александр Павлович<sup>1</sup>,  
a.p.shevelev@utmn.ru

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, Володарского, 6.

**Актуальность.** Увеличение доли трудноизвлекаемых запасов нефти среди всех месторождений углеводородов приводит к необходимости разработки газоконденсатных залежей с нефтяными оторочками. Газ, имеющий меньшую плотность, чем нефть, располагается выше неё и формирует газовую шапку. Если добывается газ из этой шапки, давление в пласте снижается. За счет появления градиента давления между газовой шапкой и нефтяной оторочкой происходит фильтрация нефти в изначально газонасыщенную область залежи. Часть такой нефти становится неизвлекаемой традиционными способами в силу наличия критической нефтенасыщенности. Разработка нефтяной оторочки и отсрочка разработки газовой шапки далеко не всегда является экономически оптимальным решением. Поэтому актуальной задачей является выбор режима разработки нефтегазоконденсатной залежи. Такой выбор можно осуществить с помощью зарекомендовавшего себя в нефтегазовой промышленности гидродинамического моделирования.

**Целью** работы является создание методики подбора режима разработки месторождений с нефтяной оторочкой и газовой шапкой с помощью гидродинамического моделирования.

**Объекты:** газоконденсатные залежи с нефтяными оторочками.

**Методы.** Моделирование основано на использовании классических законов сохранения массы и импульса для многофазной среды, решаемых с помощью неявной конечно-разностной схемы для давления и явной схемы для насыщенности фаз в гидродинамическом симуляторе. Рассчитывается несколько вариантов для одного месторождения с различными режимами разработки, отличающимися по времени перехода к совместной добычи нефти из оторочки и газа из газовой шапки, оценивается коэффициент извлечения нефти.

**Результаты.** С использованием гидродинамического симулятора получены значения конечных коэффициентов извлечения нефти для всех вариантов разработки. Установлено, что наибольший коэффициент извлечения нефти достигается при изначальной добыче нефти без разработки газовой шапки. Показано, что более поздний ввод газовой шапки в эксплуатацию позволяет достичь больших значений коэффициента извлечения нефти. Обоснован ввод в разработку газовой шапки спустя 15–20 лет после начала разработки нефтяной оторочки.

### Ключевые слова:

Гидродинамическое моделирование, нефтегазоконденсатное месторождение, механика сплошных сред, закон сохранения массы, фильтрация жидкости в пористой среде, нефтяная оторочка.

### Введение

Доля трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов нефти постоянно увеличивается [1]. К залежам с такими запасами углеводородов относятся и газоконденсатные с нефтяными оторочками [2]. Добыча нефти из таких месторождений осложнена наличием так называемой газовой шапки [3]. Она располагается выше области, содержащей нефть, поскольку газ имеет меньшую плотность, чем жидкие фазы, содержащиеся в пласте. Нефть также имеет плотность меньше, чем вода, поэтому нефтяная зона располагается между газовой шапкой и водонасыщенной зоной. Если объемы газовой шапки значительно превышают объемы нефтяной части, то последняя называется нефтяной оторочкой.

Одна из ключевых проблем при разработке таких залежей кроется в наличии динамической связи между

нефтенасыщенной и газонасыщенной частями [4]. Это проявляется в трудноконтролируемых смещениях газонефтяного контакта в процессе разработки месторождения. При этом особо остро стоит вопрос об очередности разработки нефтенасыщенной и газонасыщенной частей относительно друг друга. По характеристикам пласта (например, если оторочка находится вблизи границ пласта и её свойства малоизучены) возможно принятие решения о первоочередной разработке газовой шапки. Данная стратегия чаще всего характеризуется максимальной экономической эффективностью, однако происходит падение пластового давления и расформирование оторочки, поскольку за счет появления градиента давления между газовой шапкой и нефтяной оторочкой происходит фильтрация нефти в область газовой шапки. Часть такой нефти становится неизвлекаемой традиционными

способами в силу наличия критической нефтенасыщенности [5]. В качестве решения проблемы предлагаются закачивать газ для поддержания пластового давления и добывать большее количество нефти [3].

С точки зрения максимизации добычи нефти считается оптимальным вести первостепенную разработку оторочки. Однако в таком случае наблюдается ярко выраженное конусообразование газа. Кроме того, в этом случае оторочка ввода газовой шапки в разработку приводит к снижению экономической эффективности проекта в целом, поскольку чем раньше вводится в эксплуатацию значительная по запасам газовая шапка, тем быстрее приходит прибыль от реализации газа [6]. Можно использовать растворители [7], поверхностно-активные вещества, пены [8] для добычи нефти из оторочки, но такое решение проблемы является достаточно дорогостоящим. При этом разработка оторочек осуществляется преимущественно на режиме истощения пластовой энергии. Традиционная закачка воды приводит к проталкиванию нефти в газонасыщенную часть, и происходит техногенное расформирование оторочки, поскольку часть такой нефти становится неподвижной [9].

Для предварительной оценки вариантов разработки месторождения в нефтегазовой промышленности применяется гидродинамическое моделирование [10], являющееся математическим моделированием гидродинамических процессов в пласте. Математическое моделирование успешно зарекомендовало себя при решении не только стандартных задач фильтрации нефти в пласте [11, 12], но и задач, связанных с анизотропией пласта [10], фильтрации нефтяной оторочки в виде отдельных капель – ганглий [13].

Все описанные варианты рассматривают поочерёдную разработку нефтяной оторочки и газовой шапки. Поэтому при проектировании разработки нефтегазоконденсатных залежей помимо вариантов раздельной разработки нефтяной оторочки и газовой шапки актуально также оценивать сценарии с их совместным вводом в эксплуатацию, в том числе с некоторой временной задержкой. Оценка эффективности вариантов разработки месторождения по наиболее важному критерию для нефтегазовой промышленности – коэффициенту извлечения нефти – позволит выбрать наилучший вариант эксплуатации залежи. Методики такой оценки в настоящее время не существует. Поэтому целью работы является создание методики подбора режима разработки месторождений с нефтяной оторочкой и газовой шапкой с помощью гидродинамического моделирования на примере нефтегазоконденсатной залежи в Западной Сибири. Впервые определяется оптимальный режим разработки такой залежи с помощью оценки конечного значения коэффициента извлечения нефти для всех вариантов разработки с различным моментом времени введения в эксплуатацию газовой шапки. Такой расчёт позволит дать рекомендации по увеличению коэффициента извлечения нефти не только на рассматриваемом месторождении Западной Сибири, но и на других подобных залежах.

### Постановка задачи

Для расчёта дебита нефти и газа и определения коэффициентов извлечения этих фаз из нефтегазоконденсатного пласта необходимо вычислить изменение насыщеностей воды, газа и нефти, а также давления с течением времени. Для этого используется трёхфазная классическая модель «чёрной нефти» [12, 14], основанная на использовании законов сохранения массы фаз с учётом закона Дарси [15]. Фазами в модели считаются нефть, вода и газ, причём газ может быть растворён в нефти, поэтому нефть называется «летучей». Газ содержит долю примесей из тяжёлых углеводородов и называется «жирным». Пространство трёхмерное с декартовыми координатами  $x, y, z$ .

Уравнения модели «чёрной нефти» записываются следующим образом [12]:

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( m \rho_{om0} \left[ \frac{S_o}{B_o} + R_{og} \frac{S_g}{B_g} \right] \right) = \text{div} \sum_{i=o,g} \left( x_{oi} \rho_{im} \left[ \frac{kk_{ri}}{\mu_i B_i} (\nabla p_i - \rho_i g \nabla z) \right] \right) + q_o, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( m \rho_{gm0} \left[ \frac{S_g}{B_g} + R_{go} \frac{S_o}{B_o} \right] \right) = \text{div} \sum_{i=o,g} \left( x_{gi} \rho_{im} \left[ \frac{kk_{ri}}{\mu_i B_i} (\nabla p_i - \rho_i g \nabla z) \right] \right) + q_g, \quad (3)$$

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

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

$$\sum_{i=o,w,g} S_i = 1, \quad (6)$$

где  $t$  – время;  $m$  – пористость (отношение объёма пор к общему объёму пласта);  $i$  – индекс фазы (индекс  $o$  означает нефть,  $w$  – воду,  $g$  – газ);  $\rho_i$ ,  $\rho_{im}$  и  $\rho_{im0}$  – соответственно плотность  $i$ -й фазы, молярная плотность  $i$ -й фазы и молярная плотность  $i$ -й фазы в стандартных условиях;  $S_i$  – насыщенность  $i$ -й фазы;  $B_i$  – объёмный коэффициент  $i$ -ой фазы (отношение объёма  $i$ -й фазы в пластовых условиях к объёму этой фазы в стандартных условиях);  $k$  – тензор абсолютной проницаемости пласта (способности пласта пропускать через себя жидкости и газ), который учитывает анизотропию проницаемости;  $k_{ri}$  – относительная фазовая проницаемость  $i$ -й фазы (отношение фазовой проницаемости  $i$ -й фазы, характеризующей способность этой фазы фильтроваться через пласт, к абсолютной проницаемости пласта);  $\mu_i$  – динамическая вязкость  $i$ -й фазы;  $p_i$  – давление  $i$ -й фазы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $q_i$  – объёмные источники массы  $i$ -й фазы;  $R_{og}$  и  $R_{go}$  – растворимость нефти в газе и газа в нефти соответственно;  $x_{oi}$  и  $x_{gi}$  – мольная доля нефти в  $i$ -й фазе и газа в  $i$ -й фазе соответственно;  $p_{cog}$  и  $p_{cow}$  – капиллярное давление в системе «нефть–газ» и «нефть–вода» соответственно.

Уравнения (1)–(3) являются законами сохранения массы воды, нефти и газа соответственно с учётом закона Дарси, уравнения (4) и (5) характеризуют капил-

лярные давления систем «нефть–газ» и «нефть–вода» соответственно, уравнение (6) является замыкающим соотношением на насыщенности фаз. Неизвестными в системе уравнений (1)–(6) являются насыщенности и давления фаз.

Начальные условия для системы уравнений (1)–(6) имеют вид:

$$S_w(t = 0, M(x, y, z) \in W) = 1 - S_{or},$$

$$S_w(t = 0, M(x, y, z) \notin W) = S_{wr}, \quad (7)$$

$$S_g(t = 0, M(x, y, z) \in G) = 1 - S_{wr} - S_{or},$$

$$S_g(t = 0, M(x, y, z) \notin G) = 0, \quad (8)$$

$$p(t = 0, x, y, z) = p_0, \quad (9)$$

где  $M$  – некоторая точка;  $G$  – область газовой шапки;  $W$  – область воды;  $S_{wr}$  – связанные водонасыщенности (минимальная водонасыщенность в пласте из-за не-вытесняемой воды);  $S_{or}$  – критическая нефтенасыщенность;  $p_0$  – начальное пластовое давление.

После задания начальных условий (7)–(9) необходимо задание граничных условий:

$$\left( \frac{k k_{ri}}{\mu_i B_i} (\nabla p_i - \rho_i g \nabla z), N_j \right) = 0, i = o, w, g, \quad (10)$$

где  $N_j$  – вектор нормали к  $j$ -й границе  $D_j$ ; скобками обозначено скалярное произведение векторов.

Граничные условия (10) соответствуют условиям непротекания жидкости и газа за границы пласта и учитывают анизотропию абсолютной проницаемости при задании её тензора.

Решение уравнений (1)–(3) осуществляется с помощью IMPEs-метода [12], когда уравнения аппроксимируются с помощью конечно-разностной схемы, явной по насыщенности и неявной по давлению. Решение получающейся системы уравнений осуществляется с помощью итерационного метода Ньютона с абсолютной погрешностью 0,001.

#### Процедура моделирования крупных месторождений

Исходными данными для моделирования являются свойства пласта и насыщающих его фаз, которые берутся из геологической модели и лабораторных экспериментов с образцами горных пород (керном). Геологическая модель является имитацией пласта, разбитого на ячейки, свойства которых известны из промысловых исследований. Сетка такой модели является достаточно мелкой [16]. Её высокая дискретность обусловлена разрешающей способностью методов геофизики (порядка 0,4 м).

Для ускорения расчетов необходимо её укрупнить [17–19] с помощью пересчёта свойств пласта по формулам среднего арифметического взвешенного (11)–(13):

$$T_a = \frac{\sum_j h_j F_j T_j}{\sum_j h_j F_j}, \quad (11)$$

$$m_a = \frac{\sum_j m_j h_j F_j T_j}{\sum_j h_j F_j T_j}, \quad (12)$$

$$S_{ia} = \frac{\sum_j S_{ij} m_j h_j F_j T_j}{\sum_j m_j h_j F_j T_j}, \quad (13)$$

где  $T_a$ ,  $m_a$  и  $S_{ia}$  – средневзвешенные значения песчанистости (отношения эффективной нефтенасыщенной толщины к общей толщине), пористости и насыщен-

ности  $i$ -й фазы в укрупнённой ячейке (однако по различным ячейкам эти значения остаются разными);  $T_j$ ,  $m_j$  и  $S_{ij}$  – значения песчанистости, пористости и насыщенности  $i$ -й фазы в  $j$ -й ячейке геологической модели;  $h_j$  и  $F_j$  – толщина и площадь фильтрации (сечения)  $j$ -й ячейки геологической модели.

Проницаемость укрупнённой ячейки  $k_a$  при этом пересчитывается по степенной зависимости от пористости:

$$k_a = k_0 10^{16.181 m_a + 14.33}, \quad (14)$$

где постоянная с размерностью проницаемости  $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$ .

С учётом (11)–(14) рассчитываются свойства пласта гидродинамической модели в каждой ячейке её сетки. Дальнейшие этапы моделирования крупных месторождений с помощью специального программного обеспечения – гидродинамических симуляторов – следующие:

- задание параметров флюидов (жидких фаз и газа);
- задание зависимостей относительных фазовых проницаемостей от насыщенностей фаз по данным лабораторных исследований образцов породы;
- задание функции уплотнения породы в процессе разработки (зависимости порового объёма от пластового давления);
- инициализация модели (задание начальных условий);
- задание граничных условий, источников воды из соседних пластов, скважин;
- настройка модели на результаты фактических исследований (история разработки, расходы флюидов по скважинам);
- задание параметров расчёта на прогноз.

#### Методика оценки эффективности вариантов разработки нефтегазоконденсатного месторождения

Рассмотренная выше процедура моделирования крупных месторождений не содержит критериев оценки эффективности вариантов разработки нефтегазоконденсатного месторождения. Поэтому необходимо создание методики такой оценки. Моделирование процессов разработки осуществлялось в гидродинамическом симуляторе tNavigator компании Rock Flow Dynamics.

Для анализа влияния разработки газовой шапки на величину коэффициента извлечения нефти из оторочки была сформирована матрица вариантов расчётов, которые можно разделить на три группы: первоочередная разработка нефтяной оторочки и консервация запасов газовой шапки, первоочередная разработка газовой шапки и консервация запасов нефтяной оторочки и совместная разработка нефтяной оторочки и газовой шапки.

На первом этапе оценивался максимальный коэффициент извлечения нефти при консервации запасов газа. В расчётах была проведена оптимизация типа конструкции скважины, количества скважин, оптимального перепада давления, обеспечивающего эксплуатацию на безгазовом режиме. Оптимизация означала подбор конструкции горизонтальной скважины (её длины) и количества таких скважин для достижения максимального коэффициента извлечения нефти.

В расчётах первоочередной разработки газовой шапки проведена оптимизация количества скважин, а также дебита флюидов по критерию наибольшего коэффициента извлечения газа и приемлемого периода постоянных отборов (около 10 лет). При этом произведена количественная оценка оставшихся в пласте подвижных запасов нефти.

Затем при совместной разработке нефтяной оторочки и газовой шапки оценивался конечный коэффициент извлечения нефти (КИН) при различных темпах отбора газа. Далее аналогичная процедура проводилась при различных временах ввода в разработку нефтяной оторочки после начала разработки газовой шапки. После этого аналогично оценивался КИН при различных временах задержки эксплуатации газовой шапки после начала разработки нефтяной оторочки. Наибольший КИН среди всех вариантов свидетельствует о наиболее эффективном варианте разработки нефтегазоконденсатного месторождения.

#### Апробация методики на одном из месторождений Западной Сибири

##### Объект разработки

Апробация разработанной методики оценки эффективности вариантов разработки нефтегазоконденсатной залежи проводилась на одном из месторождений Западной Сибири. Пласт содержит газовую шапку со средней вертикальной толщиной  $h_g$  (эффективной мощностью) 19,4 м, нижележащую нефтяную оторочку со средней толщиной  $h_o$  (эффективной мощностью) 4,7 м, под которой находится водонасыщенная зона. Нефтяная зона классифицирована как оторочка, поскольку её толщина существенно меньше толщины газовой шапки. В табл. 1 приведены: средняя пористость  $m$  пласта, средняя проницаемость  $k$  пласта, начальное пластовое давление  $p_0$ , глубина залегания пласта  $H$  и другие свойства пласта.

**Таблица 1.** Свойства пласта одного из месторождений Западной Сибири

**Table 1.** Reservoir properties of one of the fields in Western Siberia

Свойство/Property	Значение/Value
$H$	3100 м (m)
$m$	0,15
$k$	$3,92 \cdot 10^{-14}$ м <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )
$h_g$	19,4 м (m)
$h_o$	4,7 м (m)
$p_0$	$3,08 \cdot 10^7$ Па (Pa)

Свойства нефти, насыщающей пласт, приведены в табл. 2, причём  $\mu_o$  означает динамическую вязкость нефти в пластовых условиях, а  $\mu_{o0}$  – динамическую вязкость нефти в стандартных условиях. Нефть содержит растворённый в ней газ с исходным газовым фактором (отношением объёма газа, содержащегося в нефти, к объёму нефти)  $\sigma$ .

Плотность газа из рассматриваемого месторождения  $\rho_g = 0,74$  кг/м<sup>3</sup>. Поскольку газ содержит некоторую часть тяжёлых углеводородных фракций, которые могут выпасть в пласте в виде конденсата, то в расчётах использовалось также потенциальное содержание

конденсата (отношение массы тяжёлых фракций к общему объёму газа), равное 0,221 кг/м<sup>3</sup>.

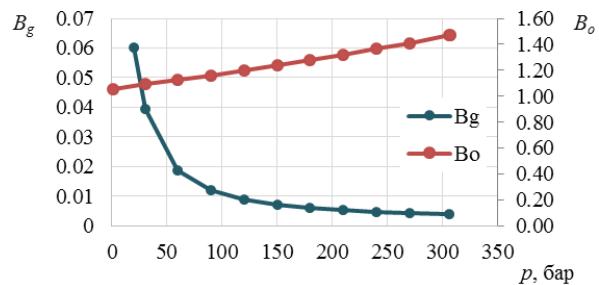
**Таблица 2.** Свойства нефти из пласта одного из месторождений Западной Сибири

**Table 2.** Oil properties of reservoir of one of the fields in Western Siberia

Свойство/Property	Значение/Value
$\rho_o$	848 кг/м <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu_o$	$3,9 \cdot 10^{-4}$ Па·с (Pa*s)
$\mu_{o0}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$ Па·с (Pa*s)
$\sigma$	0,204 м <sup>3</sup> /кг (m <sup>3</sup> /kg)

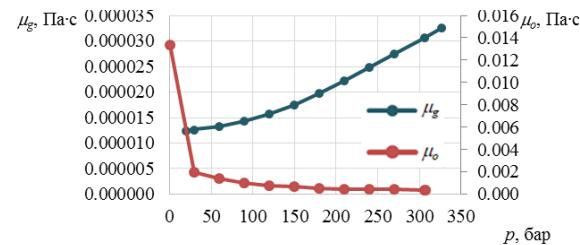
Свойства воды следующие:  $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_w = 0,32 \cdot 10^{-3}$  Па·с, сжимаемость воды  $4,28 \cdot 10^{-10}$  1/Па,  $B_w = 1,02$ , коэффициент изменения вязкости воды при увеличении давления  $9,29 \cdot 10^{-10}$  1/Па. Связанная водонасыщенность составляет 0,2, критическая нефтенасыщенность 0,32.

По результатам лабораторных исследований пластового газа и нефти определены зависимости свойств флюидов от пластового давления. На рис. 1 представлены зависимости объёмных коэффициентов газа и нефти от давления в пласте, на рис. 2 – динамических вязкостей этих фаз от  $p$ , на рис. 3 – растворимостей газа в нефти и нефти в газе от пластового давления. Погрешность определения данных параметров связана с погрешностью прямых замеров, а также с осреднением результатов экспериментов, проводимых на различных глубинных пробах флюидов, и не превышает 5 %.



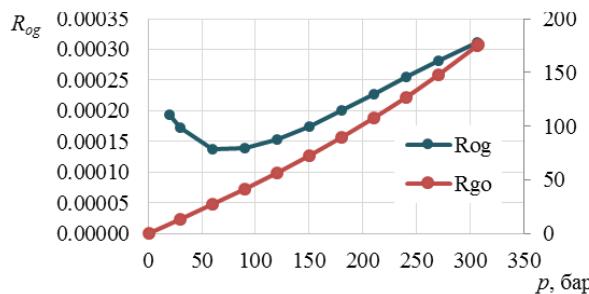
**Рис. 1.** Зависимость объёмного коэффициента нефти  $B_o$  (красная линия) и газа  $B_g$  (синяя линия) от давления в пласте  $p$

**Fig. 1.** Dependence of the volumetric coefficient of oil  $B_o$  (red line) and gas  $B_g$  (blue line) on the pressure in the reservoir  $p$



**Рис. 2.** Зависимость динамической вязкости нефти  $\mu_o$  (красная линия) и газа  $\mu_g$  (синяя линия) от давления в пласте  $p$

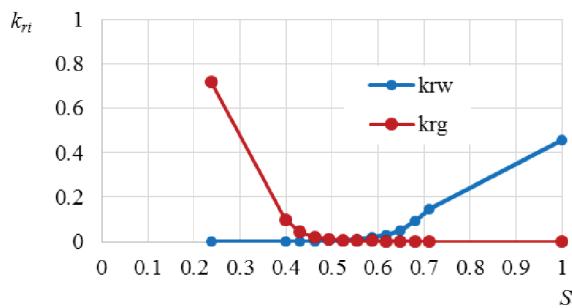
**Fig. 2.** Dependence of the dynamic viscosity of oil  $\mu_o$  (red line) and gas  $\mu_g$  (blue line) on the pressure in the reservoir  $p$



**Рис. 3.** Зависимость растворимости газа в нефти  $R_{go}$  (красная линия) и нефти в газе  $R_{og}$  (синяя линия) от давления в пласте  $p$

**Fig. 3.** Dependence of the solubility of gas in oil  $R_{go}$  (red line) and oil in gas  $R_{og}$  (blue line) on the pressure in the reservoir  $p$

Зависимости относительных фазовых проницаемостей флюидов в системах «газ–вода» (рис. 4), «нефть–вода» (рис. 5) от водонасыщенности и «нефть–газ» (рис. 6) от газонасыщенности определены по результатам лабораторных исследований керна (образцов горной породы). Относительная погрешность определения фазовых проницаемостей образцов при помощи лабораторной установки не превышает 5 %, насыщенностей – 10 % (рис. 7). Данное обстоятельство приводит к неопределенности динамики изменения подвижности фаз в процессе разработки и, как следствие, нефтеотдачи. Исходя из этого, для минимизации рисков при проектировании разработки рекомендуется дополнительно оценивать «пессимистичный» и «оптимистичный» варианты, соответствующие предельным кривым относительных фазовых проницаемостей (красная и зелёная линии на рис. 7).



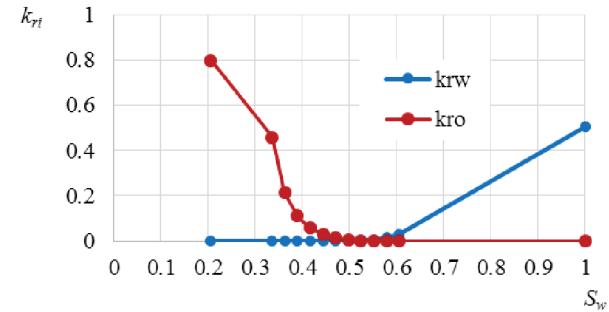
**Рис. 4.** Зависимость относительной фазовой проницаемости газа  $k_{rg}$  (красная линия) и воды  $k_{rw}$  (синяя линия) от водонасыщенности  $S_w$  в системе «газ–вода»

**Fig. 4.** Dependence of relative phase permeability of gas  $k_{rg}$  (red line) and water  $k_{rw}$  (blue line) on water saturation  $S_w$  in the «gas–water» system

Зависимость капиллярного давления в системе «нефть–вода» от водонасыщенности приведена в табл. 3. При этом  $p_{cog}=0$ .

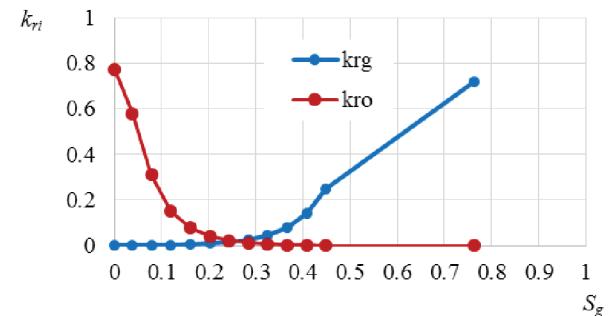
При расчётах для разработки нефтяной оторочки принимается, что скважины расположены рядами, закачка в пласт не ведётся (режим разработки на истощение залежи), установлены ограничения по минимальному дебиту нефти  $1,16 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ , по максимальной обводнённости (доли воды в добываемой жидкости)

98 %, что обусловлено экономическими причинами добычи нефти, по максимальному газовому фактору  $2,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ , по минимальному забойному давлению (давлению на открытом конце скважины в пласте)  $5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ . Расчётный период охватывает 70 лет.



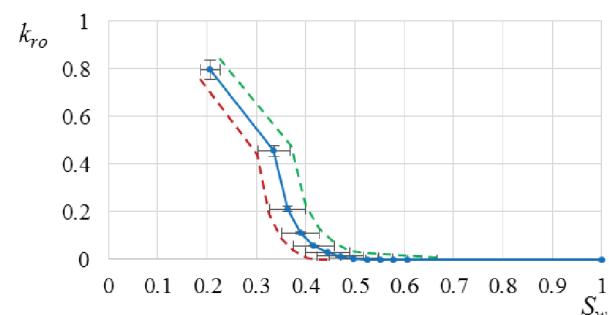
**Рис. 5.** Зависимость относительной фазовой проницаемости нефти  $k_{ro}$  (красная линия) и воды  $k_{rw}$  (синяя линия) от водонасыщенности  $S_w$  в системе «нефть–вода»

**Fig. 5.** Dependence of relative phase permeability of oil  $k_{ro}$  (red line) and water  $k_{rw}$  (blue line) on water saturation  $S_w$  in the «oil–water» system



**Рис. 6.** Зависимость относительной фазовой проницаемости нефти  $k_{ro}$  (красная линия) и газа  $k_{rg}$  (синяя линия) от газонасыщенности  $S_g$  в системе «нефть–газ»

**Fig. 6.** Dependence of relative phase permeability of oil  $k_{ro}$  (red line) and gas  $k_{rg}$  (blue line) on gas saturation  $S_g$  in the «oil–gas» system



**Рис. 7.** Оценка погрешности определения относительной фазовой проницаемости нефти  $k_{ro}$  (синяя линия) в системе «нефть–вода»

**Fig. 7.** Estimation of the error in determining the relative phase permeability of oil  $k_{ro}$  (blue line) in the «oil–water» system

Для эксплуатации газовой шапки устанавливаются следующие условия: максимальная скорость течения

газа на устье (верхнем конце) скважины 20 м/с, максимальный перепад давления в пласте составляет 20 % от  $p_0$ , минимальное устьевое давление  $8 \cdot 10^5$  Па, максимальный водогазовый фактор (отношение объёма воды к объёму газа в добываемой продукции скважины)  $3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Расчётный период составляет 70 лет.

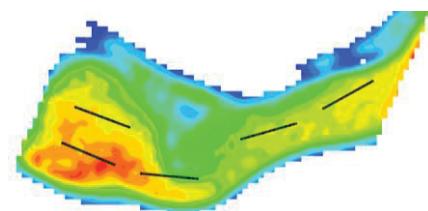
**Таблица 3.** Зависимость капиллярного давления в системе «нефть–вода» от водонасыщенности

**Table 3.** Dependence of capillary pressure in the «oil–water» system on water saturation

$S_w$	$p_{cow}$ , Па (Pa)
0,237	$3,00 \cdot 10^5$
0,399	$5,84 \cdot 10^4$
0,430	$4,59 \cdot 10^4$
0,462	$3,71 \cdot 10^4$
0,493	$3,07 \cdot 10^4$
0,524	$2,59 \cdot 10^4$
0,555	$2,20 \cdot 10^4$
0,587	$1,89 \cdot 10^4$
0,618	$1,65 \cdot 10^4$
0,649	$1,45 \cdot 10^4$
0,680	$1,31 \cdot 10^4$
0,711	$1,22 \cdot 10^4$
1	0

#### Результаты расчетов

Согласно разработанной методике, на первом этапе оценивался максимальный КИН при опережающей разработке нефтяной оторочки. В связи с низкой эффективностью использования вертикальных и наклонно-направленных скважин при разработке нефтяных оторочек [20] в данной работе рассматривалось применение горизонтальных скважин с различной длиной вскрытия залежи. В результате оптимизации конструкции скважин и их числа определены общее число скважин – 5, которые показаны на рис. 8, и длина каждой горизонтальной скважины 1000 м. Цветом на рис. 8 показана нефтенасыщенная толщина, красный цвет соответствует наибольшим значениям этой величины, далее, в соответствии с порядком цветов при дисперсии света, нефтенасыщенная толщина убывает, синий цвет соответствует наименьшим значениям этой величины. Видно, что скважины располагаются в наиболее нефтенасыщенных областях оторочки.

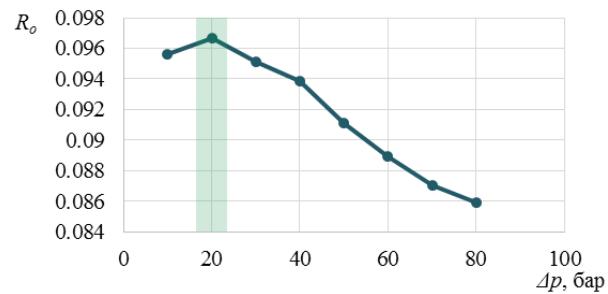


**Рис. 8.** Расположение горизонтальных скважин (чёрные линии) при разработке нефтяной оторочки

**Fig. 8.** Location of horizontal wells (black lines) in oil rim development

На рис. 9 показана зависимость коэффициента извлечения нефти  $R_o$  от перепада давления  $\Delta p$  в пласте для данного месторождения. Анализ зависимости показывает, что при оптимальном перепаде давления

$2 \cdot 10^6$  Па (показан цветом на рис. 9) достигается максимальный конечный коэффициент извлечения нефти 9,7 %. Наличие оптимума КИН связано с тем, что при дальнейшем росте перепада давления в пласте начинает возрастать количество добываемого с нефтью газа, который постепенно из-за большей своей подвижности блокирует течение нефти.



**Рис. 9.** Зависимость коэффициента извлечения нефти  $R_o$  от перепада давления  $\Delta p$  в пласте

**Fig. 9.** Dependence of oil recovery factor  $R_o$  on the differential pressure  $\Delta p$  in the reservoir

Далее по методике оценивался максимальный КИН при опережающей разработке газовой шапки. В результате оптимизации конструкции скважин и их числа определено общее число скважин – 5, которые показаны на рис. 10, и длина каждой горизонтальной скважины 500 м. Видно, что скважины располагаются в области наибольшей концентрации запасов газа и расходятся из одной точки – куста газовых скважин.

При разработке газовой шапки на истощение снижается давление в залежи. Это приводит к фильтрации нефти в газонасыщенную часть (рис. 11). При этом часть внедрившейся нефти становится неподвижной, поскольку её насыщенность меньше критической, которая для данной залежи достаточно велика и составляет 0,32. Поэтому при увеличении дебита газа  $Q_g$  увеличивается доля потерь подвижных запасов нефти  $S_{ol}$  – доля оставшихся в пласте запасов нефти из тех, что изначально могли быть добыты (рис. 12). Но спустя продолжительное время потери приходят к одному значению – около 20 % от начальных подвижных запасов нефти. Это связано с технологическими ограничениями газоконденсатных скважин, в ином случае при увеличении дебита газа доля потерь подвижных запасов всегда бы возрасала. Однако 20 % потерь подвижных запасов не означает, что КИН снизится тоже на 20 %, поскольку на этот показатель также влияет энергетический потенциал залежи, который снижается в процессе выработки запасов газа, и вязкость нефти, которая снижается вследствие её разгазирования.

Далее проводился расчёт конечного КИН при одновременной разработке нефтяной оторочки и газовой шапки, причём нефтяная оторочка разрабатывалась 5 скважинами в областях с наибольшей нефтенасыщенной толщиной. Зависимость КИН  $R_o$  от темпа отбора газа  $V_g$  (отношения объёма отбираемого в год газа к общему объёму газа в газовой шапке) приведена на рис. 13. Анализ этой зависимости по-

казывает, что с ростом темпов отбора газа КИН снижается, что обусловлено снижением эффекта вытеснения нефти газовой шапкой, запасы которой добываются быстрее.

Если же смещать, согласно разработанной методике, на более поздний срок разработку нефтяной оторочки при эксплуатации газовой шапки, то КИН снижается ещё более существенно. Это видно из рис. 14, на котором приведена зависимость относительного КИН  $R_{or}$ , равного отношению КИН при вводе нефтяной оторочки в эксплуатацию спустя некоторый промежуток времени  $t_{ro}$  после начала разработки газовой шапки – времени задержки разработки нефтяной оторочки, к значению КИН при одновременной разработке нефтяной оторочки и газовой шапки при таких же темпах отбора газа  $V_g=0,035$ . Существенное снижение КИН обусловлено значительным отбором газа до разработки нефтяной оторочки, поэтому газовая шапка почти не участвует в процессе вытеснения нефти из пласта.

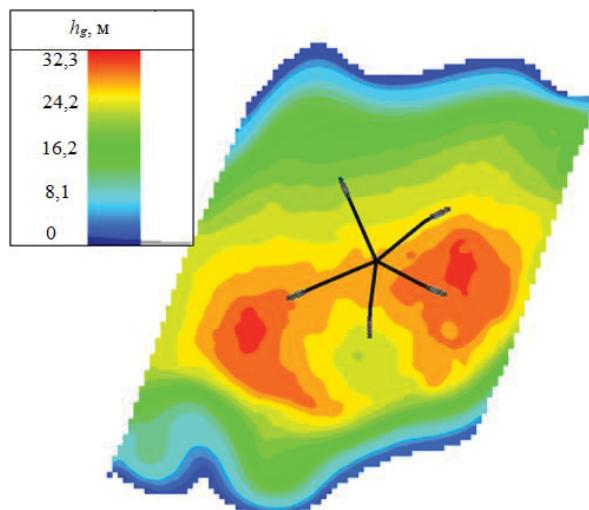


Рис. 10. Расположение горизонтальных скважин (чёрные линии) при разработке газовой шапки

Fig. 10. Location of horizontal wells (black lines) in gas cap development

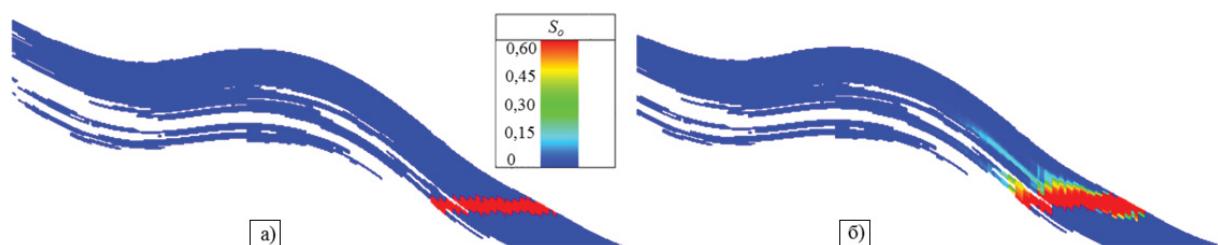


Рис. 11. Визуализация процесса расформирования нефтяной оторочки в процессе выработки запасов газовой шапки в начальный момент времени (а) и на 70 год разработки газовой шапки (б),  $S_o$  – нефтенасыщенность

Fig. 11. Visualization of oil rim disintegration during the development of gas cap reserves at the initial time (a) and at the 70<sup>th</sup> year of gas cap development (b),  $S_o$  – oil saturation

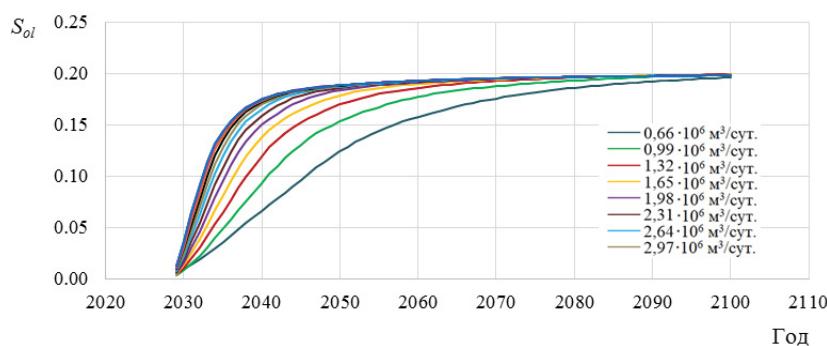


Рис. 12. Динамика доли потерь подвижных запасов нефти  $S_{ol}$  при различных значениях дебита газа  $Q_g$

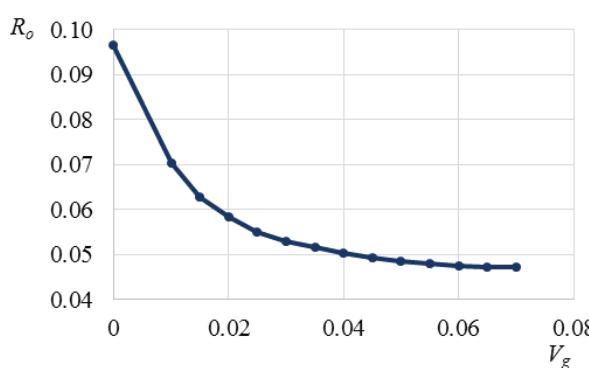
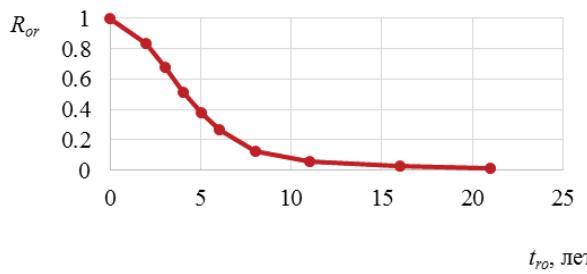


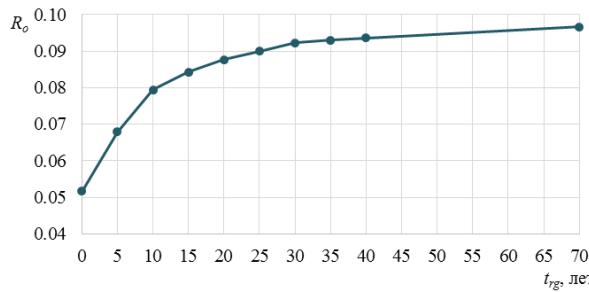
Рис. 13. Зависимость конечного коэффициента извлечения нефти  $R_o$  от темпов отбора газа  $V_g$

Fig. 13. Dependence of the final oil recovery factor  $R_o$  on the rate of gas extraction  $V_g$



**Рис. 14.** Зависимость относительного коэффициента извлечения нефти  $R_{or}$  от времени задержки разработки нефтяной оторочки  $t_{ro}$  при  $V_g = 0,035$

**Fig. 14.** Dependence of the relative oil recovery factor  $R_{or}$  on the oil rim development delay time  $t_{ro}$  at  $V_g = 0,035$



**Рис. 15.** Зависимость коэффициента извлечения нефти  $R_o$  от времени задержки разработки газовой шапки  $t_{rg}$  при  $V_g = 0,035$

**Fig. 15.** Dependence of the oil recovery factor  $R_o$  on the gas cap development delay time  $t_{rg}$  at  $V_g = 0,035$

Поскольку при разработке только нефтяной оторочки газ не добывается, то целесообразна совместная разработка этой оторочки и газовой шапки с задержкой эксплуатации газовой шапки, которая до ввода в эксплуатацию помогает вытеснить нефть из пласта из-за подвижного газа. Зависимость конечного коэффициента извлечения нефти  $R_o$  от времени задержки ввода в эксплуатацию газовой шапки  $t_{rg}$  после начала разработки нефтяной оторочки при прежних темпах отбора газа приведена на рис. 14. Анализ этой зависимости показывает, что чем позже начинается добыча газа, тем больше нефти будет добыто из пласта. Если задерживать разработку газовой шапки на 70 лет после начала разработки нефтяной оторочки,

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Киреев Т.Ф., Булгакова Г.Т., Хатмуллин И.Ф. Моделирование полимерного заводнения с использованием сетки Вороного // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11. – № 1. – С. 15–24.
- Волженина Д.А., Шарф И.В., Сабанчин И.В. Анализ эффективности применения сейклинг-технологии при разработке залежей газового конденсата // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 18–27.
- Feasibility of gas injection in gas cap for decline management of a mature offshore field / A. Thapliyal, S. Kundu, S. Chowdhury, D. Singh, H. Singh // SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. – Mumbai, India, 9–11 April 2019. – Paper № SPE-194570-MS. – P. 1–10.
- Optimum well type for oil rim reservoirs with large gas-cap and strong aquifer / S. Ogiriki, G. Imonike, N. Ogolo, M. Onyekonwu // SPE Oil and Gas Nigeria Conference and Exhibition. – Lagos, Nigeria, 2018. – Paper № SPE-193411-MS.
- Samolovov D. Analysis of factors influenced on oil rim breaking up during gas cap development // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 2019. – Paper № SPE-196914-MS.
- Uwaga A.O., Lawal K.A. Concurrent gas-cap and oil-rim production: the swing gas option // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – Abuja, Nigeria, 2006. – Paper № SPE-105985-MS.
- Kaleli M.K., Farouq Ali S.M. Controlling mobility ahead of a viscous oil bank // Annual Technical Meeting. – Calgary, Alberta, Canada, 7–10 June 1987. – Paper № PETSOC-87-38-64. – P. 1085–1110.
- Janssen M.T., Zitha P.L., Pilus R.M. Oil recovery by alkaline/surfactant/foam flooding: effect of drive-foam quality on oil-bank propagation // SPE Journal. – 2019. – V. 24. – № 6. – P. 2758–2775.

то достигается максимальный КИН 9,7 %, как при разработке только нефтяной оторочки. Однако необходима также добыча газа и его продажа, что обусловлено экономическими причинами и использованием инфраструктуры скважин, поэтому целесообразно отложить разработку газовой шапки на 15–20 лет после начала добычи нефти из оторочки, когда достигается приемлемое значение КИН в диапазоне от 8,4 до 8,8 %, когда уменьшение КИН составит в пределах 10 % от величины максимального КИН.

#### Заключение

В работе была сформирована матрица вариантов разработки нефтегазоконденсатной залежи месторождения Западной Сибири. Произведены технологические расчёты в гидродинамическом симуляторе tNavigator. По результатам расчётов можно заключить, что максимальный КИН 9,7 % достигается при первостепенной разработке нефтяной оторочки. Установлено, что в случае одновременного воздействия на нефтяную оторочку и газовую шапку КИН уменьшается за счёт снижения активности газовой шапки в процессе вытеснения нефти. При увеличении темпов отбора газа величина конечного КИН уменьшается.

Показано, что первостепенная разработка газовой шапки приводит к потерям подвижных запасов нефти и препятствованию фильтрации нефти, что значительно снижает КИН.

Определено, что наиболее целесообразным с точки зрения максимальных значений коэффициентов извлечения нефти и газа является ввод в разработку газовой шапки спустя 15–20 лет после начала разработки нефтяной оторочки.

В случае первоочередной разработки газовой шапки необходимо проводить оценку потерь подвижных запасов нефти и осуществлять контроль вытеснения нефти из оторочки при помощи разведочного фонда скважин для принятия оперативных решений.

К перспективам развития работы можно отнести создание универсальной прокси-модели (например, на основе нейросетевого моделирования), позволяющей определять оптимальную стратегию разработки нефтегазоконденсатной залежи с различными свойствами пласта и флюидов.

9. Проблемы освоения тонких нефтяных оторочек газоконденсатных залежей Восточной Сибири (на примере ботубинской залежи Чаяндинского НГКМ) / С.В. Буракова, Д.В. Изюмченко, И.И. Минаков, В.А. Истомин, Е.Л. Кумейко // Вести газовой науки. – 2013. – № 5 (16). – С. 124–133.
10. Колбиков С.В., Кузнецова Я.В., Смирнов А.Ю. Метод построения куба анизотропии и его использование в гидродинамическом моделировании // Российская нефтегазовая техническая конференция SPE. – М., Россия, 15–17 октября 2018. – Статья № SPE-191622-18RPTC-RU. – С. 1–11.
11. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.
12. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 140 с.
13. Egbogah E. The concept of relative ganglion velocity and generalization to oil- bank movements in porous media // SPE Reservoir Engineering. – 1987. – V. 2. – № 4. – P. 671–676.
14. Muskat M., Meres M.W. The flow of heterogeneous fluids through porous media // Physics. – 1936. – V. 7. – № 9. – P. 346–363.
15. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
16. Improved distance based upgridding and diffuse source upscaling for high resolution geologic models / I. Syed, C.-H. Liu, M.G. Kelkar, M.J. King // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, 26–29 October 2020. – Paper № SPE-201727-MS. – P. 1–26.
17. Al-Ibadi H., Stephen K.D., Mackay E. An analysis of numerically induced pulses in simulations of low-salinity waterflooding and their reduction by flow upscaling // SPE Journal. – 2021. – V. 26. – № 2. – P. 897–917.
18. Comprehensive study of the Oda corrected permeability upscaling method / M.G. Hariyadi, F. Sedighi, P. Ghahri, K. Ussenova, M. Zhiyengkulov // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. – Bali, Indonesia, 29–31 October 2019. – Paper № SPE-196399-MS. – P. 1–19.
19. Doorwar S., Ambastha A. Pseudorelative permeabilities for simulation of unstable viscous oil displacement // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2020. – V. 23. – № 4. – P. 1403–1419.
20. Батлер Р.М. Горизонтальные скважины для добычи нефти, газа и битумов. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2010. – 536 с.

Поступила 28.02.2022 г.

#### Информация об авторах

**Кряжев В.А.**, аспирант, Тюменский государственный университет.

**Кряжев Я.А.**, аспирант, Тюменский государственный университет.

**Гильманов А.Я.**, аспирант, Тюменский государственный университет.

**Шевелев А.П.**, кандидат физико-математических наук, профессор, Тюменский государственный университет.

UDC 532.546

## METHODOLOGY FOR SELECTING THE MODE OF DEVELOPMENT OF OIL AND GAS CONDENSATE DEPOSIT USING HYDRODYNAMIC SIMULATION

**Vsevolod A. Kriazhev<sup>1</sup>,**  
kryazhev\_seva@mail.ru

**Yaroslav A. Kriazhev<sup>1</sup>,**  
kryazhev\_yar@mail.ru

**Alexandr Ya. Gilmanov<sup>1</sup>,**  
a.y.gilmanov@utmn.ru

**Alexandr P. Shevelev<sup>1</sup>,**  
a.p.shevelev@utmn.ru

<sup>1</sup> University of Tyumen,  
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

**The relevance.** Increase in the share of hard-to-recover oil reserves among all hydrocarbon deposits leads to the need to develop gas condensate fields with oil rims. Gas with lower density than oil is located above it and forms a gas cap. If gas is produced from this cap, the reservoir pressure decreases. Due to a pressure gradient between the gas cap and the oil rim, oil flows into the initially gas-saturated area of the formation. Some of this oil becomes unrecoverable by traditional methods due to the presence of residual oil saturation. The development of an oil rim and the postponement of the development of a gas cap is not always an economically optimal solution. Therefore, a relevant task is to choose the mode of development of an oil and gas condensate field. Such a choice can be made using hydrodynamic simulation, which has shown itself well in the oil and gas industry.

**The main aim** of the work is to create a methodology for selecting the mode of development of the field with an oil rim and a gas cap using hydrodynamic simulation.

**Objects** of the research are gas condensate deposits with oil rims.

**Methods.** Simulation is based on the use of classical laws of conservation of mass and momentum for a multiphase medium, solved using an implicit finite-difference scheme for pressure and an explicit scheme for phase saturation in hydrodynamic simulator. Several options are calculated for one field with various development modes, differing in the time of transition to joint production of oil from the rim and gas from the gas cap, the oil recovery factor is estimated.

**Results.** Using a hydrodynamic simulator, the values of the final oil recovery factors for all development modes were obtained. It is established that the highest oil recovery factor is achieved with the initial oil production without the development of a gas cap. It is shown that the later development of the gas cap makes it possible to achieve large values of the oil recovery factor. The introduction of the gas cap into development 15–20 years after the beginning of the development of the oil rim is justified.

### Key words:

Hydrodynamic simulation, oil and gas condensate field, continuum mechanics, law of conservation of mass, filtration of liquid in a porous medium, oil rim.

### REFERENCES

1. Kireev T.F., Bulgakova G.T., Khatmullin I.F. Modeling of polymer flooding using Voronoi grid. *Computational Continuum Mechanics*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 15–24. In Rus.
2. Volzhenina D.A., Sharf I.V., Sabanchin I.V. Analysis of efficiency of applying cycling in reservoir development of gas condensate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 18–27. In Rus.
3. Thapliyal A., Kundu S., Chowdhury S., Singh D., Singh H. Feasibility of gas injection in gas cap for decline management of a mature offshore field. *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition*. Mumbai, India, 2019. Paper no. SPE-194570-MS. pp. 1–10.
4. Ogiriki S., Imonike G., Ogolo N., Onyekonwu M. Optimum well type for oil rim reservoirs with large gas-cap and strong aquifer. *SPE Oil and Gas Nigeria Conference and Exhibition*. Lagos, Nigeria, 2018. Paper no. SPE-193411-MS.
5. Samolovov D. Analysis of factors influenced on oil rim breaking up during gas cap development. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2019. Paper no. SPE-196914-MS.
6. Uwaga A.O., Lawal K.A. Concurrent gas-cap and oil-rim production: the swing gas option. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Abuja, Nigeria, 2006. Paper no. SPE-105985-MS.
7. Kaleli M.K., Farouq Ali S.M. Controlling mobility ahead of a viscous oil bank. *Annual Technical Meeting*. Calgary, Alberta, Canada, 1987. Paper no. PETSOC-87-38-64. pp. 1085–1110.
8. Janssen M.T., Zitha P.L., Pilus R.M. Oil recovery by alkaline/surfactant/foam flooding: effect of drive-foam quality on oil-bank propagation. *SPE Journal*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 2758–2775.
9. Burakova S.V., Izumchenko D.V., Minakov I.I., Istomin V.A., Kumeyko E.L. Problemy osvoeniya tonkikh neftyanykh otorochek gazokondensatnykh zalezhey Vostochnoy Sibiri (na primere botuobinskoy zalezhi Chayandinskogo NGKM) [Problems of development of thin oil rims of gas condensate deposits in Eastern Siberia (on the example of the Botuobinsk deposit of the Chayandinskoye oil and gas condensate field)]. *Vesti Gazovoy nauki*, 2013, no. 5 (16), pp. 124–133.
10. Kolbikov S., Kuznetsova Y., Smirnov A. Metod postroeniya kuba anizotropii i ego ispolzovanie v gidrodinamicheskem [Method of anisotropy modeling and its application to hydrodynamic simulation]. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2018. Paper no. SPE-191622-18RPTC-MS. pp. 1–9.
11. Aziz H., Settari A. *Petroleum reservoir simulation*. London, Applied Science Publishers Ltd., 1979. 476 p.
12. Kanevskaya R.D. *Matematicheskoe modelirovaniye gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdeniy uglevodorofov* [Mathematical simulation of hydrodynamic processes of development of hydrocarbon deposits]. Moscow; Izhevsk, Institut Kompyuternykh Issledovaniy Publ., 2002. 140 p.
13. Egbogah E. The concept of relative ganglion velocity and generalization to oil-bank movements in porous media. *SPE Reservoir Engineering*, 1987, vol. 2, no. 4, pp. 671–676.

14. Muskat M., Meres M.W. The flow of heterogeneous fluids through porous media. *Physics*, 1936, vol. 7, no. 9, pp. 346–363.
15. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground hydromechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 416 p.
16. Syed I., Liu C.-H., Kelkar M.G., King M.J. Improved distance based upgridding and diffuse source upscaling for high resolution geologic models. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, 2020. Paper no. SPE-201727-MS, pp. 1–26.
17. Al-Ibadi H., Stephen K.D., Mackay E. An analysis of numerically induced pulses in simulations of low-salinity waterflooding and their reduction by flow upscaling. *SPE Journal*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 897–917.
18. Haridy M.G., Sedighi F., Ghahri P., Ussenova K., Zhiyenkulov M. Comprehensive study of the Oda corrected permeability upscaling method. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Bali, Indonesia, 2019. Paper no. SPE-196399-MS, pp. 1–19.
19. Doorwar S., Ambastha A. Pseudorelative permeabilities for simulation of unstable viscous oil displacement. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 1403–1419.
20. Butler R.M. *Horizontal wells for the recovery of oil, gas and bitumen*. Petroleum Society of the CIM, 1996. 228 p.

Received: 28 February 2022.

#### Information about the authors

- Vsevolod A. Kriazhev*, postgraduate, University of Tyumen.  
*Yaroslav A. Kriazhev*, postgraduate, University of Tyumen.  
*Alexandr Ya. Gilmanov*, postgraduate, University of Tyumen.  
*Alexandr P. Shevelev*, Cand. Sc., professor, University of Tyumen.

УДК 622.02:531+622.83

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ТЕРРИГЕННОГО КОЛЛЕКТОРА В ПРОЦЕССЕ СНИЖЕНИЯ ЗАБОЙНОГО И ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИНЫ

Попов Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
popov@ipng.ru

Чернышов Сергей Евгеньевич<sup>2</sup>,  
nirgnf@bk.ru

Гладких Евгений Александрович<sup>2</sup>,  
gladkih.ea@mail.ru

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа Российской академии наук,  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3.

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью учета эффектов деформаций терригенных пород-коллекторов и изменения проницаемости пласта при прогнозе продуктивности нефтяных скважин в условиях варьирующихся значений пластового и забойного давлений.

**Цель:** на основе лабораторных экспериментов выявить закономерности изменения проницаемости образцов керна терригенного коллектора при изменении пластового и забойного давлений и оценить степень влияния данных эффектов на продуктивность нефтяной скважины.

**Объекты:** терригенные породы-коллекторы нефтяных месторождений, расположенные на юге Пермского края.

**Методы:** лабораторные исследования по определению проницаемости образцов керна на фильтрационной установке при различных величинах порового давления и давления обжима образцов; численное моделирование околоскважинной зоны методом конечных элементов с использованием основных соотношений теории пороупругости Бюо для определения величины эффективных напряжений и оценки их влияния на проницаемость пород-коллекторов и продуктивность нефтяной скважины.

**Результаты.** Получены аналитические зависимости, описывающие изменение проницаемости при снижении и восстановлении пластового (забойного) давления, которые показали снижение проницаемости образцов керна на 20,6 % при предельном снижении порового давления с 14,5 до 5 МПа. При восстановлении давления до первоначальной величины проницаемость восстанавливается только до 84,5 % от исходного значения, что говорит о существенной роли необратимых пластических деформаций породы. Результаты численного моделирования распределения эффективных напряжений в околоскважинной зоне показали, что при создании максимальной депрессии 9,5 МПа коэффициент продуктивности уменьшается на 10 %. Если уменьшить депрессию и восстановить забойное давление, то коэффициент продуктивности восстановится до 92 % от первоначального, что опять же говорит о негативной роли пластических деформаций породы-коллектора. Если пластовое давление снижается до 8,5 МПа, то величина снижения коэффициента продуктивности составит 13 % по сравнению с максимальным значением.

### Ключевые слова:

терригенный коллектор, проницаемость, образец керна, пластовое давление, забойное давление, эффективное напряжение, скважина, коэффициент продуктивности.

### Введение

При разработке месторождений нефти и газа как в процессе бурения и заканчивания скважин [1–4], так и при освоении продуктивных пластов [1, 2, 5, 6] может происходить трансформация природных свойств пластов-коллекторов. Одним из таких факторов является увеличение эффективных напряжений вследствие снижения забойного и пластового давлений. Подобные эффекты могут привести к деформациям пород-коллекторов и, как следствие, к уменьшению пористости и проницаемости продуктивного пласта [7–12]. Зачастую терригенные коллекторы более подвержены изменению фильтрационно-емкостных свойств за счет худших упруго-прочностных свойств по сравнению с карбонатными породами. В таком случае снижение проницаемости в продуктивной залежи может достигать десятков процентов [11, 12] по сравнению с первоначальным значением при исход-

ном значении пластового давления. Как следствие снижения проницаемости будет происходить уменьшение продуктивности добывающих скважин. Если пластовое давление снизилось во всей залежи, то даже при пуске новых скважин их первоначальные дебиты будут гораздо ниже дебитов скважин, ввод в эксплуатацию которых происходил при исходном пластовом давлении. Подобные эффекты снижения проницаемости проявляются для коллектора порового [11–14] и трещинного типов, при этом для трещиноватого коллектора такие эффекты могут быть еще более негативными за счет большей интенсивности снижения проницаемости систем трещин при малейшем уменьшении давления флюида [8, 15, 16].

На данный момент существует множество научных исследований, посвященных лабораторным экспериментам, изучающим вариации фильтрационно-емкостных свойств пласта при воздействии различ-

ной величины эффективных напряжений, имитирующих изменение порового давления [7, 13, 15]. В то же время следует отметить, что в большинстве таких работ не учитывается длительное влияние вязкопластических деформаций на изменение пористости и проницаемости. Подобные эффекты проявляются при длительном воздействии постоянной величины повышенных эффективных напряжений [11, 12, 14], и они особенно характерны для терригенных коллекторов. В связи с этим в рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования на образцах керна, отобранных из терригенного продуктивного пласта одного из месторождений юга Пермского края. Исследования проводились при трех циклах длительной выдержки образцов в течение 11,5 часов при постоянной величине расчетных значений эффективных напряжений. Общая длительность каждого эксперимента составила 39 часов.

На основе результатов экспериментов были получены аналитические зависимости, описывающие изменение проницаемости породы-коллектора с учетом меняющихся значений эффективных напряжений при снижении и восстановлении пластового или забойного давлений. Полученные соотношения использовались в дальнейшем при численном моделировании напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны в программном комплексе ANSYS, в котором реализована пороупругая модель Био. В результате численных расчетов получены закономерности изменения проницаемости и продуктивности скважины при различной величине депрессии на пласт и пластового давления. Показана негативная роль вязкопластических деформаций породы-коллектора при увеличении эффективных напряжений.

#### Подготовка образцов керна и разработка программы исследования

Для изучения длительного воздействия эффективных напряжений, вызванных снижением пластового или забойного давлений, на изменение проницаемости были отобраны образцы керна из терригенного продуктивного объекта одного из нефтяных месторождений юга Пермского края (рис. 1). Средняя глубина исследуемого пласта – 1489 м, начальное пластовое давление в залежи – 14,5 МПа, давление насыщения нефти газом – 8,5 МПа.

Образцы длиной и диаметром 3 см выбуривались из исходного кернового материала, затем они были экстрагированы и высушены (рис. 1). Для всех образцов определялась проницаемость по газу для условий минимального эффективного напряжения 0,5 МПа. Данные исследования проводились на установке ПИК-ПП. На основе данных исследований было установлено, что средняя пористость образцов равна 22,4 %, средняя проницаемость – 656 мД. Из полученной подборки образцов для дальнейших длительных исследований были отобраны несколько образцов с максимальной проницаемостью, не имеющих трещин и состоящие преимущественно из песчаника (без примеси глин). Образцы насыщались остаточной водой, соответствующей по составу пластовой воде,

чтобы исключить изменение их природных свойств под воздействием химических реакций и эффекта Ребиндера, затем образцы насыщались керосином.



Рис. 1. Фотография исходного кернового материала и образцов керна, подготовленных для испытаний

Fig. 1. Picture of the original core material and the core samples prepared for testing

Длительные исследования проводились на установке УИК-5ВГ, позволяющей измерять проницаемость образцов при фильтрации жидкости. В экспериментах варьировались значения порового давления (давления жидкости) и давления обжима таким образом, чтобы эффективные напряжения, действующие на образец, соответствовали некоторым характерным условиям эксплуатации залежи:

- 1) начальные пластовые условия (эффективное напряжение 14,2 МПа);
- 2) снижение порового давления на 3 МПа – с 14,5 до 11,5 МПа (эффективное напряжение 17,2 МПа);
- 3) максимальное снижение порового давления на 9,5 до 5 МПа (эффективное напряжение 23,7 МПа).

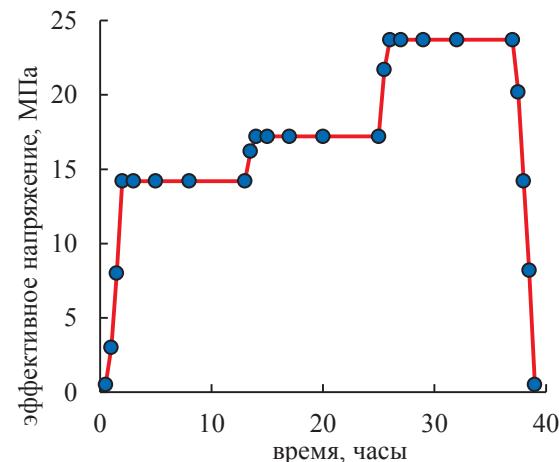


Рис. 2. Изменение эффективных напряжений в образце в процессе экспериментов (программа исследований)

Fig. 2. Change in effective stresses in the sample during the experiments (research program)

На рис. 2 приведен график изменения эффективных напряжений (программа исследований) в соответствии с вышеуказанными условиями. Из данного графика видно, что общее время проведения каждого эксперимента составило 39 часов. Также следует обратить внимание, что в программе исследований заложено три цикла выдержки образцов при постоянном повышенном эффективном напряжении. Такие условия проведения эксперимента требовались для выявления степени влияния не только упругих, но и вязкопластических деформаций породы на проницаемость образцов керна. Каждый цикл выдержки составлял 11,5 часов, в течение которых производилось пять измерений проницаемости, при этом время выдержки внутри каждого цикла увеличивалось с 0,5 до 5 часов, т. к. вязкопластические деформации затухают с течением времени.

#### Результаты длительных исследований образцов керна и определение закономерности изменения проницаемости от эффективных напряжений

В силу длительности экспериментов исследования были проведены для трех образцов керна. На рис. 3 для примера представлены характерные результаты

эксперимента для одного из испытанных образцов. На данном рисунке показано изменение проницаемости в зависимости от эффективных напряжений и времени проведения эксперимента. Как видно из рис. 3, при росте эффективных напряжений до 14,2 МПа (начальные пластовые условия) происходит существенное снижение проницаемости: с 745 до 563 мД, или на 24,4 %. Затем при постоянной выдержке образца при таком же значении эффективных напряжений, происходит дальнейшее уменьшение проницаемости с 563 до 530 мД, или на 5,9 %. Подобный эффект снижения проницаемости связан с влиянием вязкопластических деформаций породы.

После увеличения эффективных напряжений (до 17,2 МПа во втором цикле и до 23,7 МПа в третьем) и выдержке при их постоянной величине проницаемость также продолжает снижаться (рис. 3). Как видно из рис. 3, при постоянной величине напряжений изменение проницаемости имеет затухающий характер, что говорит о том, что вязкопластические деформации породы стремятся к предельному значению при соответствующих значениях эффективных напряжений.

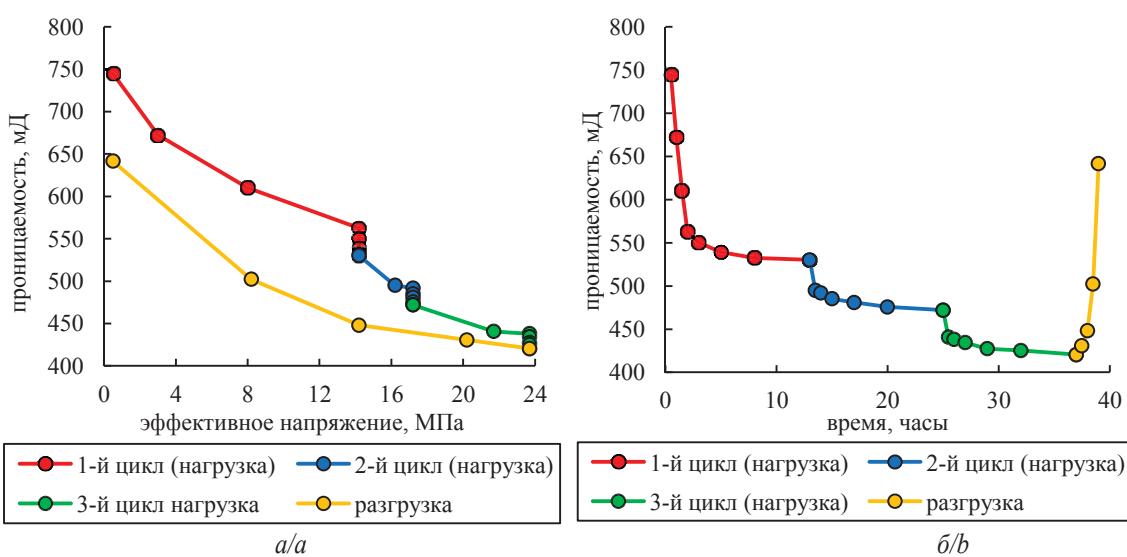


Рис. 3. Изменение проницаемости образца керна в процессе эксперимента в зависимости от эффективных напряжений (а) и времени (б)

Fig. 3. Change in the core sample permeability during the experiment depending on the effective stress (a) and time (b)

Результаты эксперимента показали, что при восстановлении эффективных напряжений до первоначальной величины 0,5 МПа характеристика проницаемости образца не восстановилась до своего первоначального значения 745 мД, а лишь до 642 мД, или до 86,2 %, т. е. суммарное снижение проницаемости за счет вязкопластических деформаций составило 13,8 %.

На основе полученных закономерностей изменения проницаемости были определены аппроксимирующие функции изменения данной характеристики от эффективных напряжений (рис. 4).

Функции подбирались для интервала изменения эффективных напряжений от 14,2 МПа (начальные

пластовые условия) до эффективных напряжений 23,7 МПа (предельное снижение порового давления до 5 МПа), при этом значение проницаемости бралось из конечной точки выдержки, чтобы учесть вязкопластические деформации, а затем нормировалось к предельной величине в первом цикле выдержки (530,1 мД). Помимо ветви нагрузки при увеличении эффективных напряжений и снижении проницаемости (что соответствовало уменьшению пластового или забойного давления), аппроксимирующая функция также подбиралась для ветви уменьшения эффективных напряжений (восстановление пластового или забойного давления).

На рис. 4 синими кружками представлены осредненные относительные значения проницаемости по всем трем испытанным образцам, которые определены по последним точкам в каждом цикле выдержки образцов при постоянном эффективном напряжении. Если соотнести снижение проницаемости от начальных условий до условий снижения пластового давления до 5 МПа, то получим, что среднее снижение проницаемости составило 20,6 %, что является весьма существенным. Подобные эффекты должны учитываться при прогнозе изменения продуктивности скважины на различных режимах ее работы и при снижении давления в залежи.

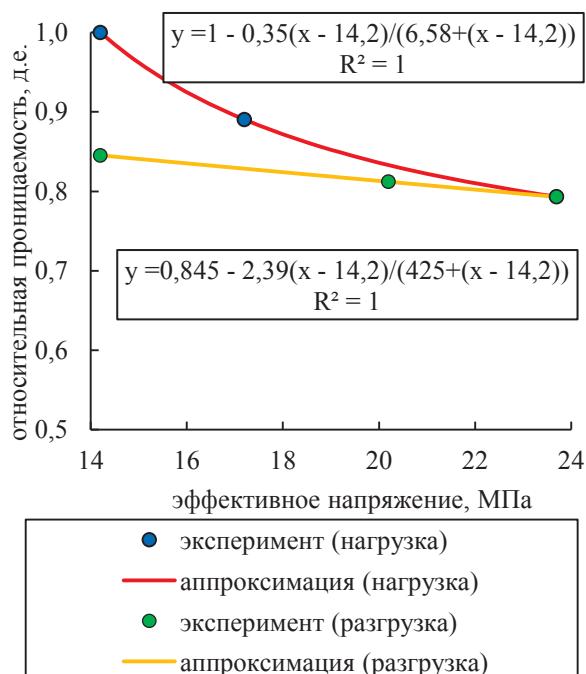


Рис. 4. Аппроксимация среднего изменения относительной проницаемости, определенного на основе экспериментов для интервала реальных пластовых и забойных давлений

Fig. 4. Approximation of the average change in relative permeability determined on the basis of experiments for the real reservoir and bottomhole pressures range

При обработке результатов подобных экспериментов исследователи используют различные аппроксимирующие функции [17, 18]. Часто применяется подход, когда сначала подбирается функция изменения величины пористости образцов от напряжений, а затем, по полученной ранее в экспериментах зависимости проницаемости от пористости, уже определяют закономерность изменения проницаемости [1, 2, 20, 22].

В научной публикации [12] приведена зависимость, которая достаточно точно отражает закономерность изменения относительной (нормированной) проницаемости при увеличении эффективных напряжений: интенсивное ее снижение при начальном росте напряжений и дальнейшее выполнование графика при росте нагрузки (снижение давления флюида):

$$k_{rel} = 1 - \frac{a(\sigma_{av}^{eff} - \sigma_0^{eff})}{b + (\sigma_{av}^{eff} - \sigma_0^{eff})},$$

где  $k_{rel}$  – относительная (нормированная) проницаемость, д. е.;  $a$  – эмпирический коэффициент, д. е.;  $b$  – эмпирический коэффициент, (МПа);  $\sigma_{av}^{eff}$  – среднее эффективное напряжение в пласте (МПа);  $\sigma_0^{eff}$  – среднее эффективное напряжение в образце, соответствующее начальным пластовым условиям (МПа).

Окончательные выражения для аналитических функций, полученных после статистической обработки образцов, представлены на рис. 4. Данные зависимости использовались при прогнозе изменения проницаемости и продуктивности скважин на основе численного моделирования эффективных напряжений в околоскважинной зоне при изменении пластового и забойного давлений.

#### Численное моделирование напряженного состояния околоскважинной зоны и определение продуктивности скважины с учетом изменения проницаемости от эффективных напряжений в условиях снижения пластового и забойного давлений

В настоящее время для расчета распределения эффективных напряжений, как в околоскважинной зоне пласта, так и на месторождении в целом, применяют численные методы, основанные на соотношениях теории пороупругости Био [1, 2]. Такие методы учитывают распределение напряжений в скелете породы и распределение порового давления флюида в залежи. В данной публикации для прогноза вариаций эффективных напряжений вблизи скважины применялся численный метод конечных элементов, реализованный в программном продукте ANSYS с учетом соотношений пороупругости. В ряде публикаций, как отечественных, так и зарубежных специалистов, показано, что данный программный комплекс хорошо зарекомендовал себя при решении задач подобного рода, связанных с разработкой месторождений углеводородного сырья [4, 7, 22]. Подробное описание соотношений пороупругости Био и их численная реализация описаны в публикациях [23–25].

Значения основных характеристик, использованных в расчетах приведены в таблице, численная расчетная осесимметрическая конечно-элементная схема околоскважинной зоны показана на рис. 5. Использованные параметры, приведенные в таблице, были определены на основе реальных экспериментов с образцами керна и промысловых исследований рассматриваемого продуктивного объекта одного из месторождений юга Пермского края. Как видно из рис. 5, конечные элементы сгущались вблизи стенки скважины для достижения достаточной точности расчета, т. к. на данном участке происходит наиболее интенсивное изменение расчетных параметров: давления флюида, эффективных напряжений и проницаемости.

При расчетах задавались два типа граничных условий для двух моделируемых фаз (твердой (породы) и жидккой):

- 1) для флюида – давление на стенке скважины и на контуре питания;

- 2) для породы – нулевые перемещения на нижней и правой границе модели, напряжение на верхней границе модели и давление на стенке скважины.

Конечно-элементная расчетная схема использовалась для проведения многовариантных расчетов эффективных напряжений в околоскважинной зоне при различных величинах пластовых и забойных давлений. В результате расчетов на основе распределения эффективных напряжений и с учетом зависимостей, приведенных на рис. 4, было получено распределение проницаемости и скорость фильтрации флюида на стенке скважины, на основе которой уже и определялся ее дебит. Следует отметить, что при численном моделировании имитировался открытый ствол скважины, т. е. крепь не учитывалась.

Основные результаты расчетов представлены на рис. 6, 7, где показаны наиболее важные характеристики скважины и коллектора: распределение проницаемости в околоскважинной зоне и зависимость относительного (нормированного) коэффициента продуктивности скважины от депрессии. Следует отметить, что при определении коэффициента продуктивности учитывались соотношения, характеризующие снижение и восстановление проницаемости. Нормирование величин проницаемости и коэффициента продуктивности производилось к максимальному значению.

Из рис. 6 видно, что наиболее интенсивное снижение проницаемости происходит вблизи стенки скважины, что является следствием возникновения депрессионной воронки, уменьшения забойного давления и увеличения эффективных напряжений. Проницаемость снижается более интенсивно при увеличении депрессии на пласт. Для начального пластового давления 14,5 МПа при увеличении депрессии с 4 до 9,5 МПа максимальное снижение проницаемости (на стенке скважины) составляет от 6 до 17 % (рис. 6, а).

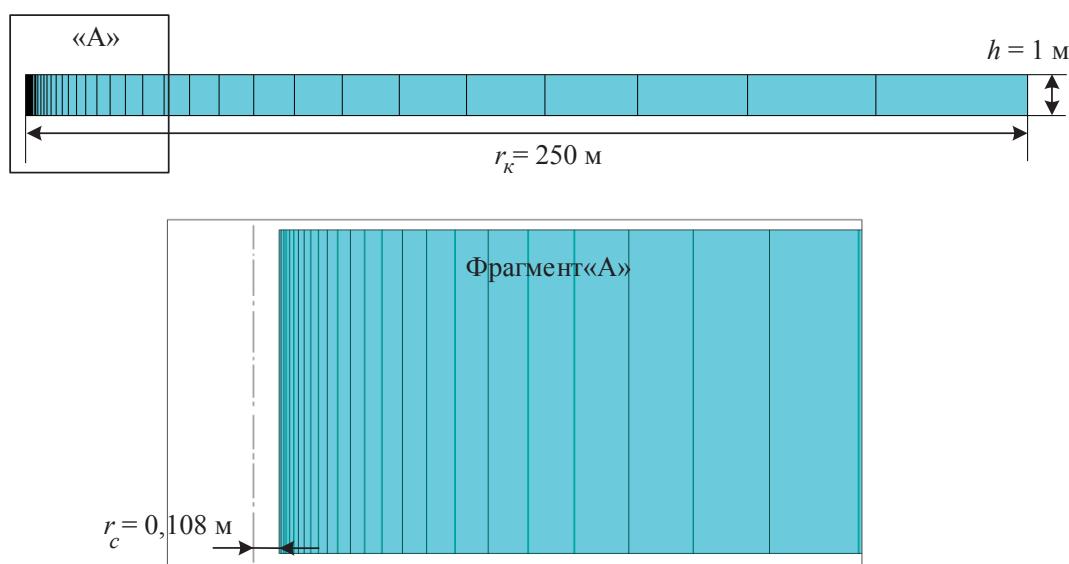
**Таблица.** Значения параметров, заданных при численном моделировании околоскважинной зоны

**Table.** Values of the parameters specified in the numerical simulation of the near-wellbore zone

Параметр/Parameter	Единицы измерения Units	Значение Value
модуль упругости/elastic module	МПа/MPa	9 400
коэффициент Пуассона/Poisson's ratio	д.е.	0,32
коэффициент Бю/Бю's ratio	д.е.	0,75
давление в скважине/well pressure		5–14,5
давление на контуре питания pressure at radial extent	МПа/MPa	14,5
вертикальное напряжение vertical stress		32,8
радиус скважины/well radius		0,108
радиус контура питания/radial extent	м/m	250
высота модели/model height		1
начальное значение проницаемости initial permeability value	мД/mD	530
пористость/porosity	%	22,4

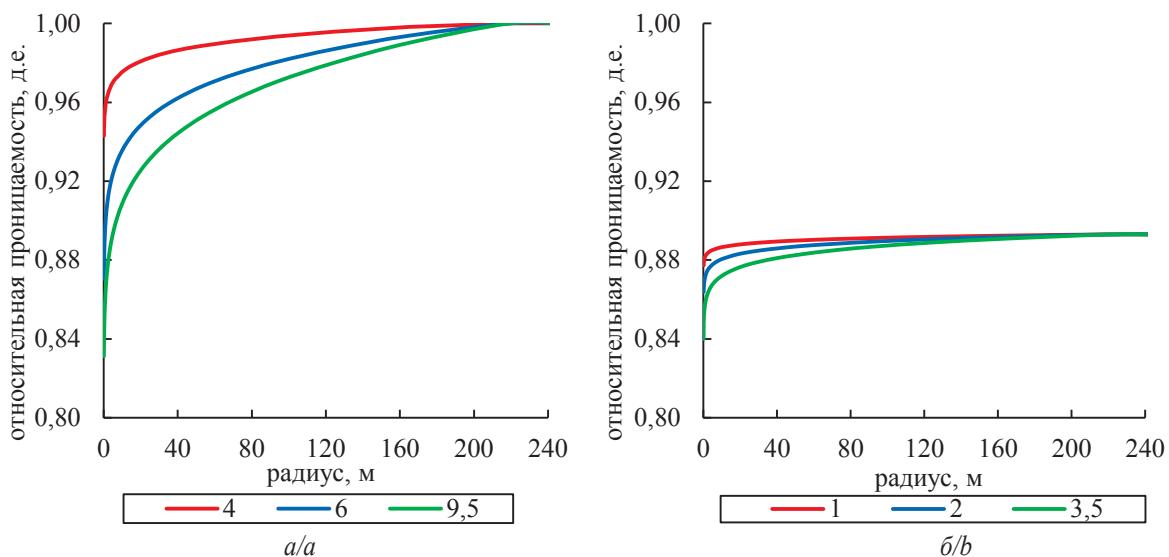
При снижении пластового давления в залежи с 14,5 до 8,5 МПа происходит снижение проницаемости уже во всей околоскважинной зоне на 8 % (рис. 6, б) даже без создания депрессии на пласт. При снижении забойного давления до предельной величины 5 МПа проницаемость продолжает снижаться еще на 8,7 %.

Для более наглядного анализа влияния деформаций породы при изменении пластового и забойного давлений на работу скважины были построены графики изменения коэффициента продуктивности от депрессии (рис. 7), который определялся как дебит скважины, деленный на депрессию на пласт. В расчетах моделировался коэффициент продуктивности, как при увеличении депрессии, так и при ее уменьшении, что соответствует прямому и обратному ходу так называемых индикаторных диаграмм скважин, которые строятся при гидродинамических исследованиях на различных режимах работы (при различной депрессии).



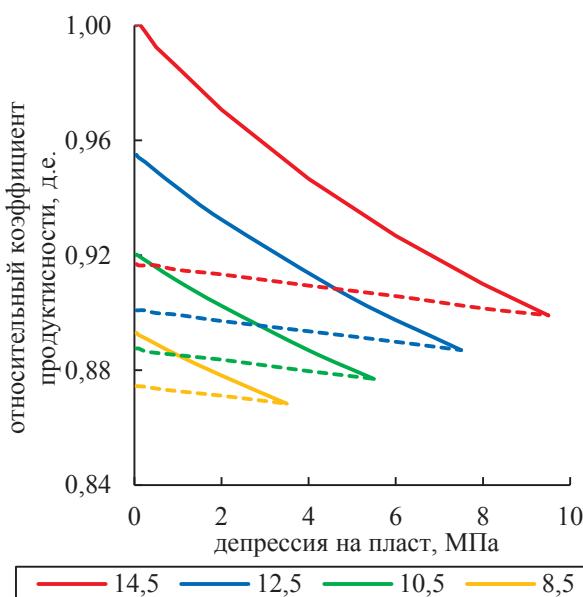
**Рис. 5.** Конечно-элементная схема осесимметричной численной модели околоскважинной зоны, используемой для моделирования напряженного состояния пласта вблизи скважины

**Fig. 5.** Finite element scheme of the near-wellbore zone axisymmetric numerical model used to simulate the stress state of the reservoir near the well



**Рис. 6.** Изменение относительной проницаемости пласта в зависимости от радиуса удаления от скважины при различной величине депрессии на пласт (МПа) для начального пластового давления 14,5 МПа (а) и при снижении пластового давления до 8,5 МПа (б)

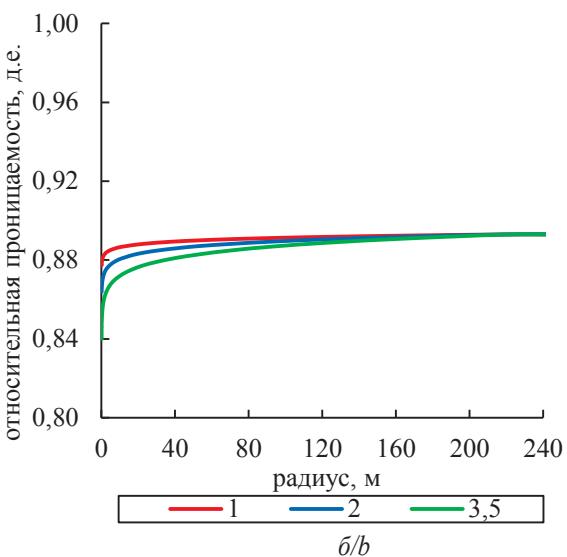
**Fig. 6.** Change in the relative reservoir permeability depending on the distance from the well at different drawdown values (MPa) for initial reservoir pressure of 14,5 MPa (a) and with a decrease of reservoir pressure to 8,5 MPa (b)



**Рис. 7.** Изменение относительного коэффициента продуктивности скважины в зависимости от депрессии для различной величины пластового давления (в МПа). Сплошная линия – увеличение депрессии, пунктирная – уменьшение

**Fig. 7.** Change in the relative well productivity depending on bottomhole pressure drawdown for different values of reservoir pressure (in MPa). Solid line – increase in bottomhole pressure drawdown, dotted line – decrease in bottomhole pressure drawdown

Из рис. 7 видно, что для условий начального пластового давления 14,5 МПа, если создается максимальная депрессия на пласт 9,5 МПа, за счет уплотнения породы-коллектора происходит снижение коэффициента продуктивности на 10 %. После снижения депрессии и восстановления забойного давления



до первоначального значения величина коэффициента продуктивности восстанавливается только до 92 %, т. е. потеря продуктивности скважины за счет создания такой депрессии и влияния вязкопластических деформаций составит 8 %, что является весьма существенной величиной.

Если давление в продуктивной залежи начнет снижаться до 12,5, 10,5 и 8,5 МПа, то даже при минимальной депрессии коэффициент продуктивности снизится на 10, 11 и 13 %, соответственно. Максимальное снижение коэффициента продуктивности соответствует максимальному моделируемому снижению давления (8,5 МПа) и максимальной депрессии 3,5 МПа и составит 13,5 %. Как и в случае с первоначальным пластовым давлением после уменьшения депрессии и восстановления забойного давления величина коэффициента продуктивности не восстанавливается до первоначального значения (рис. 7). Полученные результаты моделирования имеют существенное практическое значение, и их необходимо учитывать при проектировании разработки месторождений, а также при расчете прогнозных дебитов для различных режимов работы добывающих скважин.

#### Выводы

В данной публикации приведены результаты длительных экспериментальных исследований образцов керна и показано влияние вязкопластических деформаций на проницаемость терригенного коллектора на примере одного из нефтяных месторождений юга Пермского края. На основе применения экспериментального и численного методов показано влияние изменения пластового и забойного давлений на изменение проницаемости пласта и продуктивность скважины. Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Авторами была разработана специальная программа длительных исследований образцов керна с целью изучения влияния изменяющихся эффективных напряжений и вязкопластических деформаций на проницаемость при различной величине снижения пластового или забойного давлений. Особенностью программы исследований являлись три цикла выдержки образцов при постоянных эффективных напряжениях.
2. Лабораторные эксперименты показали, что проницаемость снижалась как в процессе увеличения эффективных напряжений, так и при постоянной нагрузке, что характеризует влияние не только упругих, но и вязкопластических деформаций. Исследования показали, что если поровое давление снижается с 14,5 до 5 МПа, то проницаемость уменьшится на 20,6 %, что является весьма существенным. Результаты лабораторных исследований были обработаны, и получены аналитические зависимости, описывающие изменение проницаемости как при росте эффективных напряжений (снижение пластового или забойного давлений), так и при их уменьшении (восстановления пластового или забойного давлений).
3. Полученные аналитические зависимости использовались при численном моделировании напряженного состояния околоскважинной зоны методом конечных элементов с учетом основных соотношений теории пороупругости Био. Результаты численных расчетов показали, что при начальном пластовом давлении 14,5 МПа и создании максимальной депрессии на пласт происходит максимальное снижение проницаемости на стенке скважины на 17 %. Если снизить пластовое давление до 8,5 МПа, то проницаемость во всей залежи уменьшится на 8 %. Если при этом создать депрессию 3,5 МПа, то будет происходить дальнейшее уменьшение проницаемости, но уже только в околоскважинной зоне еще на 8,7 %.
4. Результаты моделирования с учетом зависимости коэффициента продуктивности от депрессии также показали существенное влияние деформаций породы на дебит скважины. Так, для начальных пластовых условий и депрессии 9,5 МПа коэффициент продуктивности снизится на 10 %. Если восстановить забойное давление до первоначального, то коэффициент продуктивности восстановиться только до 92 %. Максимальное снижение коэффициента продуктивности соответствовало минимальному пластовому давлению 8,5 МПа и депрессии 3,5 МПа. В таком случае величина снижения коэффициента продуктивности составит 13 %.
5. Полученные результаты экспериментального и численного моделирования говорят о весьма существенном влиянии деформаций исследованных терригенных пород-коллекторов на проницаемость при снижении пластового и забойного давлений. Данный факт говорит о необходимости учета подобных эффектов при проектировании разработки месторождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zoback M. D. Reservoir geomechanics. – Cambridge, U.K.: Cambridge University press, 2007. – 505 p.
2. Petroleum related rock mechanics / E. Fjær, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen, R. Risnes. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 492 p.
3. Конесен В.Г., Четвертнева И.А., Тептерева Г.А. Особенности методологии выбора растворов первичного вскрытия продуктивных пластов на основе проведения фильтрационных экспериментов на керне // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 168–175.
4. Chernyshov S.E., Popov S.N. The influence of geomechanical factors on the oil well productivity and the bottom-hole zone permeability of reservoir exposed by slotted perforation // Processes in GeoMedia. V. III. – Cham: Springer Geology, 2021. – Р. 167–182.
5. Дорфман М.Б., Сентемов А.А. Влияние фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта на эффективность кислотной обработки // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 124–130.
6. Изучение эффективности применения кислотных составов в терригенных коллекторах Пермского края, на основе экспериментальных исследований образцов керна / В. Плотников, В. Рехачев, Н. Барковский, Н. Михайлов, С. Попов // Труды Российской нефтегазовой технической конференции SPE 2018. – М., 2018. – С. 1–10.
7. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М.: Изд-во «Горная книга», 2019. – 552 с.
8. Дзюбло А.Д., Бороздин С.О. Новые данные комплексного исследования геомеханических и петрофизических свойств пород-коллекторов Долгинского месторождения Печорского моря // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 105–115.
9. Popov S.N., Kusaiko A.S. Experimental study of the effect of filtration for low-mineralized water with high temperature on changes in elastic and strength properties of reservoir rocks // Processes in GeoMedia. V. III. – Cham: Springer Geology, 2021. – Р. 343–349.
10. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа // Записки горного института. – 2021. – Т. 251. – № 5. – С. 658–666.
11. Оптимизация параметров и сроков ввода системы поддержки пластового давления с учетом изменения фильтрационно-емкостных свойств пластов / О.Ю. Кашников, С.В. Гладышев, С.Н. Попов, Ю.А. Кашников // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 5. – С. 80–83.
12. Попов С.Н., Мазанов С.В., Жариков М.Г. Разработка геомеханической модели для прогноза изменения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов трещинно-порового типа в процессе снижения пластового давления (на примере ачимовских отложений месторождений нефти и газа Крайнего Севера) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 6. – С. 47–55.
13. Pettersen O. Compaction, permeability, and fluid flow in brent-type reservoirs under depletion and pressure blowdown // The open petroleum engineering journal. – 2010. – № 3. – Р. 1–13.
14. Сонич В.П., Черемисин Н.А., Батурина Ю.Е. Влияние снижения пластового давления на фильтрационно-емкостные свойства пород // Нефтяное хозяйство. – 1997. – № 9. – С. 52–57.
15. Гидродинамическое моделирование разработки участка Юрубченко-Тохомского месторождения на основе геологогеомеханической модели / Ю.А. Кашников, Д.В. Шустов, С.Ю. Якимов, Н.Б. Красильникова // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 62–67.
16. Simulation of the pressure-sensitive seepage fracture network in oil reservoirs with multi-group fractures / Y. Feng, Y. Liu, J. Chen, X. Mao // Fluid Dynamics & Material Processing. – 2022. – V. 18. – № 2. – Р. 395–415.

17. Compaction-Induced porosity/permeability reduction in sandstone reservoirs: data and model for elasticity-dominated deformation. / P.M.T.M. Schutjens, T.H. Hansen, M.H.H. Hettema, J. Merour, P. de Bree, J.W.A. Coremans, G. Helliesen // SPE Reservoir evaluation & engineering. – 2004. – V. 7 (03). – P. 202–216.
18. Stress sensitivity of porosity and permeability under varying hydrostatic stress conditions for different carbonate rock types of the geothermal Malm reservoir in southern Germany / D. Bohnsack, M. Potten, S. Freitag, F. Einsiedl, K. Zosseeder // Geothermal Energy. – 2021. DOI: 10.1186/s40517-021-00197-w.
19. To T., Chang C. Comparison of different permeability models for production-induced compaction in sandstone reservoir // The journal of engineering geology. – 2019. – V. 29. – № 4. – P. 367–381.
20. Xue Y. Numerical simulation of coal deformation and gas flow properties around borehole // CMES. – 2017. – V. 113. – № 4. – P. 429–441.
21. Research on the damage of porosity and permeability due to perforation on sandstone in the compaction zone / S. Xue, X. Zhu, L. Zhang, S. Zhu, G. Ye, X. Fan // CMC. – 2016. – V. 12. – № 1. – P. 21–42.
22. Влияние ориентации и схемы размещения каналов щелевой перфорации на проницаемость терригенных коллекторов в околоскважинной зоне пластов / С.Г. Ашихмин, С.Е. Чернышов, Ю.А. Кашников, Д.И.М. Макдоналд // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 132–135.
23. Zienkiewicz O.C. The finite element method. – London: McGraw-Hill, 1977. – 787 p.
24. Settari A., Mourits F.M. A coupled reservoir and geomechanical simulation system // SPE Journal. – 1998. – V. 3. – Iss. 03. – P. 219–226.
25. Settari A., Walters D. A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction // SPE Reservoir Simulation Symposium: Proceedings. – Houston, 1999. – P. 1–13.

Поступила 15.06.2022 г.

#### Информация об авторах

**Попов С.Н.**, доктор технических наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник лаборатории нефтегазовой механики и физико-химии пласта Института проблем нефти и газа Российской академии наук.

**Чернышов С.Е.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Гладких Е.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.02:531+622.83

## INFLUENCE OF SANDSTONE RESERVOIR DEFORMATIONS DURING BOTTOMHOLE AND RESERVOIR PRESSURE DECREASING ON THE PERMEABILITY AND WELL PRODUCTIVITY CHANGES

Sergey N. Popov<sup>1</sup>,

popov@ipng.ru

Sergey E. Chernyshov<sup>2</sup>,

nirgnf@bk.ru

Evgeniy A. Gladkikh<sup>2</sup>,

gladkikh.ea@mail.ru

<sup>1</sup> Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science,  
3, Gubkin street, Moscow, 119333, Russia.

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to take into account the effects of sandstone reservoir rocks deformations and changes in reservoir permeability for predicting oil wells productivity under conditions of varying values of reservoir and bottomhole pressures.

**The main aim** of the research is based on the results of laboratory experiments, to identify relationships of changes in the sandstone reservoir core samples permeability with changes in reservoir and bottomhole pressures and to assess the degree of these effects influence on the oil well productivity.

**Objects:** sandstone reservoir rocks of the oil fields located in the south of the Perm Region.

**Methods:** laboratory research of the core samples permeability using the laboratory equipment at various values of pore pressure and sample compression pressure; numerical simulation of the near-wellbore zone by the finite element method using the basic relationships of the Biot theory of poroelasticity to determine the magnitude of effective stresses and their effect on the reservoir rocks permeability and oil well productivity.

**Results.** The authors have obtained the analytical relationships that describe the change in permeability with a decrease and recover of reservoir and bottomhole pressure, which showed a decrease in the permeability of core samples by 20,6 % with a limiting decrease in pore pressure from 14,5 to 5 MPa. When the pressure is recovered to the initial value, the permeability is restored only by 84,5 %, which indicates a significant role of rocks irreversible plastic deformations. The results of numerical modeling of the effective stresses distribution in the near-wellbore zone showed that in case of creating the maximum bottomhole pressure drawdown of 9,5 MPa the productivity factor decreases by 10 %. If the drawdown is reduced and the bottomhole pressure is recovered, then the productivity factor recovers just to 92 % of the initial value, which again indicates the negative role of plastic deformations of the reservoir rock. If the reservoir pressure drops to 8,5 MPa, then the reducing in the productivity factor is 13 % compared to the maximum value.

### Key words:

sandstone reservoir, permeability, core sample, reservoir pressure, bottomhole pressure, effective stress, well, productivity ratio.

### REFERENCES

1. Zoback M. D. *Reservoir geomechanics*. Cambridge, U.K., Cambridge University press, 2007. 505 p.
2. Fjeær E., Holt R.M., Horsrud P., Raen A.M., Risnes R. *Petroleum related rock mechanics*. Amsterdam, Elsevier, 2008. 492 p.
3. Konecnev V.G., Chetvertneva I.A., Teptereva G.A. Peculiarities of methodology for selecting of primary opening of productive formations based on filtration experiments on core. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 168–175. In Rus.
4. Chernyshov S.E., Popov S.N. The influence of geomechanical factors on the oil well productivity and the bottom-hole zone permeability of reservoir exposed by slotted perforation. *Processes in GeoMedia*. Vol. III. Cham, Springer Geology, 2021. pp. 167–182.
5. Dorfman M.B., Sentemov A.A. Influence of reservoir properties of the bottomhole zone on acidizing efficiency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 2, pp. 124–130. In Rus.
6. Plotnikov V., Rekhachev P., Barkovsky N., Amirov A., Mikhaylov N., Popov S. Izuchenie effektivnosti primeneniya kislotnykh sostavov v terrigennykh kollektorakh Permskogo kraya, na osnove eksperimentalnykh issledovaniy obraztsov kerna [Study and efficiency of acid compositions application in the clastic reservoirs of Perm region based on experimental studies of core samples].
7. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G. *Mekhanika gornykh porod pri razrabotke mestorozhdeniy uglevodorochnogo siyra* [Rock mechanics in petroleum industry]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2019. 552 p.
8. Dzublo A.D., Borozdin S.O. New data of a comprehensive geomechanical and petrophysical study of the Dolginskoe field reservoir properties. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 105–115. In Rus.
9. Popov S.N., Kusaiko A.S. Experimental study of the effect of filtration for low-mineralized water with high temperature on changes in elastic and strength properties of reservoir rocks. *Processes in GeoMedia*. Vol. III. Cham, Springer Geology, 2021. pp. 343–349.
10. Zhukov V.S., Kuzmin Y.O. Experimental evaluation of compressibility coefficients for fracture and intergranular pores of an oil and gas reservoir. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, no. 5, pp. 658–666. In Rus.
11. Kashnikov O.Y., Gladyshev S.V., Popov S.N., Kashnikov Y.A. Optimization of parameters and period of reservoir pressure maintenance system commissioning taking into account changes in

- reservoir filtration-capacity properties. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2010, no. 5, pp. 80–83. In Rus.
12. Popov S.N., Mazanov S.V., Zharikov M.G. Development of geomechanical model for forecasting changes of reservoir properties of fracture-pore type of reservoir in the process of reducing the pore pressure (for example, the Achimov plays of oil and gas of the Far North). *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2015, no. 6, pp. 47–55. In Rus.
  13. Pettersen O. Compaction, permeability, and fluid flow in brent-type reservoirs under depletion and pressure blowdown. *The open petroleum engineering journal*, 2010, no. 3, pp. 1–13.
  14. Sonich V.P., Cheremisin N.A., Baturin Yu.E. Effect of reducing reservoir pressure in reservoir properties. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 1997, no. 9, pp. 52–57. In Rus.
  15. Kashnikov Y.A., Shustov D.V., Yakimov S.Y., Krasilnikova N.B. Hydrodynamic simulation of part of Yurubcheno-Tokhomovskoye oil field based on geological geomechanical model. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2015, no. 4, pp. 62–67. In Rus.
  16. Feng Y., Liu Y., Chen J., Mao X. Simulation of the pressure-sensitive seepage fracture network in oil reservoirs with multi-group fractures. *Fluid Dynamics & Material Processing*, 2022, vol. 18, no. 2, pp. 395–415.
  17. Schutjens P.M.T.M., Hansen T.H., Hettema M.H.H., Merour J., De Bree P., Coremans J.W.A., Helliesen G. Compaction-Induced porosity/permeability reduction in sandstone reservoirs: data and model for elasticity-dominated deformation. *SPE Reservoir evaluation & engineering*. 2004, vol. 7 (03), pp. 202–216.
  18. Bohsack D., Potten M., Freitag S., Einsiedl F., Zosseeder K. Stress sensitivity of porosity and permeability under varying hydrostatic
  - stress conditions for different carbonate rock types of the geothermal Malm reservoir in southern Germany. *Geothermal Energy*, 2021. DOI: 10.1186/s40517-021-00197-w.
  19. To T., Chang C. Comparison of different permeability models for production-induced compaction in sandstone reservoir. *The Journal of Engineering Geology*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 367–381.
  20. Xue Y. Numerical simulation of coal deformation and gas flow properties around borehole. *CMES*, 2017, vol. 113, no. 4, pp. 429–441.
  21. Xue S., Zhu X., Zhang L., Zhu S., Ye G., Fan. X. Research on the damage of porosity and permeability due to perforation on sandstone in the compaction zone. *CMC*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 21–42.
  22. Ashikhmin S.G., Chernyshov S.E., Kashnikov Yu.A., Macdonald D.I.M. A geomechanical analysis of the influence of orientation and placement of jet slots on terrigenous reservoir permeability. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2018, no. 6, pp. 132–135. In Rus.
  23. Zienkiewicz O.C. *The finite element method*. London, McGraw-Hill, 1977. 787 p.
  24. Settari A., Mourits F.M. A Coupled reservoir and geomechanical simulation system. *SPE Journal*, 1998, vol. 3, Iss. 03, pp. 219–226.
  25. Settari A., Walters D.A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction. *SPE Reservoir Simulation Symposium: Proceedings*. Houston, 1999. pp. 1–13.

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

- Sergey N. Popov**, Dr. Sc., head of the laboratory, Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science.
- Sergey E. Chernyshov**, Dr. Sc., head of Oil and Gas Technology Department, Perm National Research Polytechnic University.
- Evgeniy A. Gladkikh**, Cand Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 622.276:681.5

## ФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ОСВОЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ЭЦН И ПРАВИЛА ЕЁ СОПРОВОЖДЕНИЯ

Соловьев Илья Георгиевич<sup>1,2</sup>,  
igsolovyev123@gmail.com

Говорков Денис Александрович<sup>2</sup>,  
dagovorkov@mail.ru

Константинов Иван Владимирович<sup>2</sup>,  
ivkonstantinov95@yandex.ru

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр СО РАН,  
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

**Актуальность** исследования связана с поиском путей и средств повышения эффективности управления процессами эксплуатации скважин с погружными электроцентробежными насосами на основе построения факторной модели динамики освоения эксплуатационного ресурса и её параметрической идентификации по данным промыслового контроля режимных состояний работы силового агрегата до отказа. В отличие от фундаментальной математической физики старения изоляции и механического износа, введённое упрощенное описание динамики освоения ресурса отражает связь периода наработки на отказ с обсуждаемыми и актуальными в практике эксплуатации факторами снижения эксплуатационной надёжности в целом для всей установки.

**Цель:** формализация модели динамики освоения эксплуатационного ресурса электроцентробежного насоса с непрерывным режимом эксплуатации скважин, формализация исчисления ресурса и факторов ускоренного старения; разработка алгоритма параметрического оценивания эксплуатационного блока модели ресурса с контролем корректности счёта по информативности данных режимов эксплуатации выделенной группы скважин.

**Объекты:** скважины непрерывного фонда, обустроенные электроцентробежным насосом.

**Методы:** термобарическое моделирование переменных состояний скважинных систем с регрессионным оцениванием динамики освоения эксплуатационного ресурса на основе данных контроля режимных состояний работы выделенной подгруппы непрерывного фонда скважин с близкими потенциалами наработок; технология структурно-параметрического оценивания эксплуатационного блока модели ресурса с контролем информативности регрессоров по схеме ортогонального разложения.

**Результаты исследования и выводы.** Контроль кумулятивно освоенной доли энергетического потенциала (ресурса), конструктивно заложенного изготавителем изделия, позволяет прогнозировать период наработки на отказ установки с явным учетом действия факторов ускоренного старения и износа. Кластеризация изделий конструктивно близких по исполнению и типоразмерам в равно-надёжные по периоду наработки на отказ подгруппы позволяет вычленить основную задачу идентификации эксплуатационного блока регрессионной модели ресурса с последующим доопределением модели конструктивного блока. Контроль информативности факторного поля исходных данных динамики износа на основе ортогонализации регрессоров по методу ведущего элемента позволяет корректировать размерность поля факторов, обеспечивая устойчивость искомых параметрических оценок. На примере статистических испытаний по промысловым данным для подгруппы из 33 скважин показано кратное снижение уровня среднеквадратической ошибки параметрического оценивания при редукции выявленного малоинформативного фактора – перенапряжения. Полученные результаты могут служить теоретико-методической основой создания адаптивной системы контроля динамики освоения ресурса непрерывного фонда скважин с электроцентробежным насосом для оптимизации регламентов ремонтно-технического обслуживания, режимов эксплуатации и выбора параметров обустройства скважин.

### Ключевые слова:

Модель, факторы износа, ресурс, потенциал наработки, электроцентробежный насос, скважина, регрессионный анализ, идентификация, ортогональное оценивание.

### Вводный анализ

Период наработки на отказ  $T$  погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН) – одна из главных характеристик в задачах планирования и управления процессами нефтедобычи. Под периодом наработки на отказ ЭЦН будем понимать суммарное время работы силовой установки с момента его пуска до момента отказа. Потенциал периода наработки на отказ  $T^0$  закладывается на стадиях проектирования и изготовления изделия [1–3] и обеспечивается комфор-

тными условиями работы на этапе эксплуатации. Задачи, модели и алгоритмы обеспечения функциональной надёжности на этапах конструирования и эксплуатации глубинно-насосного оборудования неодинаковы. Оценка законов распределения отказов как традиционными методами [4–7], так и с использованием современных подходов по машинному обучению [8, 9], отражают общие закономерности и осреднённые показатели надёжности управляемых процессов. Такие оценки могут оказаться слишком грубыми для

оптимизации технологических режимов, регламентов и параметров обустройства каждой скважин ЭЦН-ом. Контроль режимных состояний работы погружного оборудования средствами устьевой и глубинной телеметрии [10] позволяет оценивать действия индивидуальных факторов ускоренного износа с прогнозом периода наработки для каждой силовой установки [11, 12].

Традиционная статистика отказов [13], в том числе и преждевременных, свидетельствует, что основными причинами остановов являются:

- потеря изоляции (пробой) плоского кабеля, разъемной муфты, силового кабеля, статорных обмоток погружного электродвигателя (ПЭД);
- механические сломы валов, опорных подпятников и подшипников скольжения, сломы и заклинивания ступеней насоса;
- разгерметизация и потеря гидрозащиты.

В отличие от задач и методов покомпонентного учёта и анализа динамики освоения ресурса ЭЦН [14], направленного в большей мере на совершенствование конструктивных решений по изделию, цель *настоящей работы* – дать целостное описание динамики освоения ресурса установки для скважин непрерывного фонда на основе выделения и формализации суммарных эксплуатационных факторов ускоренного износа и старения [15]. Создание и цифровая реализация таких моделей в системах в реальном времени имеют многофункциональное назначение. Это:

- задачи контроля и управления эксплуатационным ресурсом фонда скважин, обустроенных ЭЦН, с прогнозами периодов наработки на отказ в реальных производственных условиях;
- оптимизация режимов, регламентов и параметров обустройства скважин при замене ЭЦН после отказа;
- системы сопровождения и планирования графиков ремонтно-технических работ по замене погружного оборудования;
- системы планирования и управления запасами комплектующих ЭЦН нужных типоразмеров.

#### Ресурс ЭЦН, определение и факторная модель динамики его освоения

Как было показано в [15], построение и использование факторной модели динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН в задачах выбора режима, регламента эксплуатации и параметров обустройства скважин существенно *расширяет круг определений оптимальных решений* с оценкой показателей эффективности нефтедобычи на полном жизненном цикле работы погружного оборудования.

Построение подобных моделей основано на обобщении опыта обустройства и эксплуатации скважин силовыми установками, работающими в разных режимных состояниях с учетом действий осложняющих факторов [16, 17]. За основу конструкции ресурсной модели принят шаблон (системная концепция) линейной регрессии [18], когда выделяется *выходная* переменная  $E(t)$  – объём освоенной части эксплуатационного (функционального) ресурса изделия к мо-

менту времени  $t$  с начала эксплуатации в момент  $t=0$  и *входные* (регрессионные) переменные  $v_N(i,t)$ , отражающие кумулятивное действие факторов ускоренного износа (старения) с коэффициентами влияния  $a_N(i)$ , где  $i$  – номер фактора. Последующее конструирование основано на ряде предположений.

*Первое предположение.* Пусть потенциальный ресурс новой установки, заложенный заводом изготовителем, оценивается максимально достижимым уровнем реализуемой полезной работой центробежного насоса на полном жизненном цикле, т. е. максимальным количеством отданной энергии в комфортно-номинальных условиях эксплуатации силового блока

$$E^0 = \gamma_0 q^0 h^0 T^0. \quad (1)$$

Здесь  $N_2^0 = \gamma_0 q^0 h^0$  – полезная работа насоса типоразмера  $\langle q^0, h^0 \rangle$  с номинальной производительностью  $q_N = q^0$  и напором  $h_N = h^0$  при перекачке воды с удельным весом  $\gamma_0$ , а  $T^0$  – потенциал периода наработки на отказ, закладываемый производителем оборудования. В условиях (1) искомое представление модели динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН (*второе предположение*) введём равенством [15, 19]

$$E(t) = \int_0^t \left[ \gamma(t) q_N(t) h_N(t) + \gamma_0 q^0 h^0 \cdot \left( \sum_{i=1}^5 a_N(i) \cdot v(i) \right) \right] dt, \quad (2)$$

где первое подынтегральное слагаемое – производственные затраты ресурса, исчисляемые в работе насоса  $N_2(t) = \gamma(t) q_N(t) h_N(t)$  с производительностью  $q_N(t)$  и напором  $h_N(t)$  по перекачке жидкости с удельным весом  $\gamma(t)$ . Последующие слагаемые интегральной суммы – непроизводственные затраты ресурса, отражающие действие факторов ускоренного износа центробежного насоса (ЦН) и ПЭД в долях от нормативного уровня полезной работы выбранного типоразмера:  $N_2^0 = \gamma_0 q^0 h^0$ ,  $a_N(i)$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, 5\}$  – настроочные параметры, подлежащие определению по данным контроля режимов эксплуатации скважин. В работе выделяются пять главных факторов (2) ускоренного износа и риска отказа.

- Фактор упругопластических изгибов жёсткой удлинённой конструкции «ЦН-ПЭД» и трения при её погружении в искривлённый наклонно направленный ствол скважины

$$v(1 | \omega_N(t), H_N) = \\ = \omega_N(t) \sum_l \left[ \alpha_{1l} \left( \frac{H_N}{H_R} - \delta H_l \right)_+ + \alpha_{2l} 1 \left( \frac{H_N}{H_R} - \delta H_l \right) \right].$$

Здесь  $\omega_N(t) = (1-s)\omega(t)$  – относительная скорость вращения вала двигателя со скольжением  $S$  и относительной частотой питающего напряжения  $\omega(t)$ ,  $\delta H_l = \frac{H_l}{H_R}$  – относительные отметки уровней погружения с соответствующими средними показателями  $\alpha_{1l}$  набора угла кривизны ствола скважины,  $\alpha_{2l}$  – значимый уровень приращения угла кривизны (если та-

ковой имеется) в интервале  $(H_l, H_{l+1})$ ;  $l$  – порядковый номер интервала (рис. 1-1).

Здесь и далее используется обозначение:

$$(x)_+ = (x, \text{ если } x > 0) \vee (0, \text{ если } x \leq 0),$$

$$1(x) = (1, \text{ если } x > 0) \vee (0, \text{ если } x \leq 0).$$

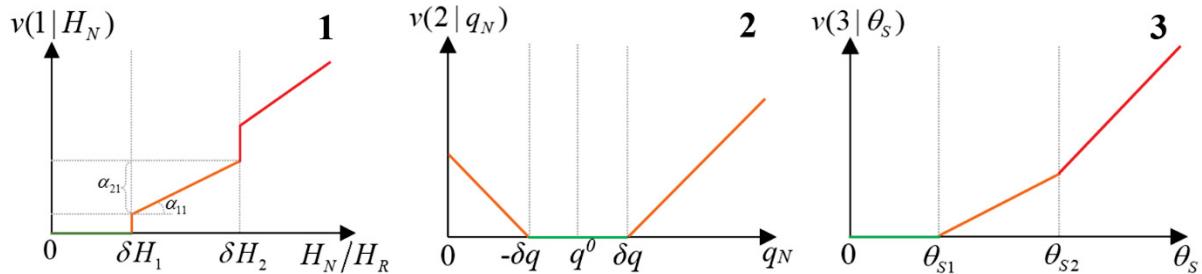


Рис. 1. Графики зависимостей для факторных функций упругопластических изгибов и трения конструкции «ЦН-ПЭД» (1), отклонений от nominalного режима подачи (2) и уровня перегрева изоляции ПЭД и плоского кабеля (3)

Fig. 1. Dependence charts for factorial functions of elastic bends and friction of the submersible unit installation (1), deviations from the nominal productivity (2) and the level of overheating of the SEM insulation and cable (3)

- Фактор отклонений от nominalного режима подачи [20]

$$v(2|q_N(t)) = \left( \left| \frac{q_N(t)}{q^0} - 1 \right| - \delta q \right)_+$$

с симметричной зоной нечувствительности  $[-\delta q, \delta q]$  (рис. 1-2).

- Фактор уровня перегрева изоляции ПЭД и плоского кабеля [21]

$$v(3|\theta_s(t)) = \frac{1}{\theta_{s3}} \left( (\theta_s(t) - \theta_{s1})_+ + \alpha_\theta (\theta_s(t) - \theta_{s2})_+ \right),$$

где  $\theta_s(t) = (1 - \mu_s) \theta_B(t) + \mu_s \theta_P(t)$  – взвешенная сумма температур нагрева кабеля и ПЭД,  $\mu_s \in [0,2;0,8]$ ,  $\theta_{s1}, \theta_{s2}, \theta_{s3}$  – настраиваемые параметры (рис. 1-3).

- Фактор контроля перегрузки по полезным мощностям для ПЭД и ЦН

$$v(4|P_2(t), N_2(t)) = \left( \frac{P_2(t)}{P_2^0} - 1 \right)_+ + \left( \frac{N_2(t)}{N_2^0} - 1 \right)_+,$$

где  $P_2(t)$  – мощность на валу двигателя,  $N_2(t)$  – полезная работа на выходе насоса,  $P_2^0$  и  $N_2^0$  – их nominalные значения по шкале выбранных типоразмеров.

- Фактор риска пробоя изоляции вследствие перенапряжения, обусловленного законом линейной вариации напряжения:  $U_1(t) = \omega U_1^0$  в технологиях частотного регулирования подачи

$$v(5|U_1(t)) = \left( \frac{U_1(t)}{U_1^0} - 1 \right)_+ + \alpha_U \left( \frac{U_1(t)}{U_1^0} - \delta U \right)_+, \quad \delta U > 1,$$

где  $U_1^0$  – контрольный уровень перенапряжения для выбранного типоразмера ПЭД с nominalным значением  $U_1^0$  (подобно рис. 1-3).

При непрерывном контроле и прогнозировании факторных функций ускоренного износа  $v_N(1,t) = v(1|o_N(t), H_l), \dots, v_N(5,t) = v(5|U_1(t))$  оценка периода наработки на отказ осуществляется по условию

$$T = \arg \left\{ \int_0^T E^0 = E(t) \right\},$$

что, согласно (1) и (2), соответствует выражениям

$$T = \arg \left\{ T^0 = \int_0^T (y(t) + \mathbf{a}_N^T \mathbf{v}_N(t)) dt \right\}$$

или

$$T = \arg \left\{ T^0 = \Delta E(t) + \mathbf{a}_N^T \mathbf{V}(t) \right\}, \quad (3)$$

где

$$\Delta E(t) = \int_0^t y(t) dt, \quad y(t) = \frac{\gamma(t) q_N(t) h_N(t)}{\gamma_0 q^0 h^0}$$

– отношение реально производимой работы к расчётно-номинальной, а векторы параметров и регрессоров определяются следующим образом

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_N &= [a_N(1) \dots a_N(5)]^T, \\ \mathbf{V}(t) &= [V(1,t) \dots V(5,t)]^T = \\ &= \left[ \int_0^t v_N(1,t) dt \dots \int_0^t v_N(5,t) dt \right]^T. \end{aligned} \quad (4)$$

Оценка периода наработки на отказ, необходимая для первичной оптимизации режима и параметров обустройства скважины ЭЦН [22], в стационарных условиях эксплуатации, когда выполнено  $\Delta E(T) = T_y$ ,  $V(1) = T v_N(1), \dots, V(5) = T v_N(5)$ , рассчитывается согласно (2)–(4) явным образом

$$T = \frac{T^0}{y + \mathbf{a}_N^T \mathbf{v}_N}. \quad (5)$$

#### Правила идентификации по данным промыслового контроля

Практическая реализация и использование факторных моделей подобного класса (3), (5), помимо данных непрерывного контроля о режимных состояниях работы погружного оборудования, информации о конструкции ствола и механической устойчивости притока, требуют априорной оценки вектора параметров чувствительности  $\mathbf{a}_N$  к факторам износа и данных о потенциале периода наработки на отказ  $T^0$  ЭЦН. Величина  $T^0$ , закладываемая конструкторскими

решениями, используемыми материалами, технологиями и культурой изготовления, неодинакова для изделий разных производителей, классов исполнений и разных типоразмеров. В этой связи *введём ещё одно, третье, предположение*: все изделия по производителям, по сходству конструктивных решений, производственно-технологических линий и используемых материалов объединяются в равно-надёжные группы. Зависимость потенциала периода наработки на отказ  $T^0(k)$  всех изделий группы от варианта комплектации  $k$ -й скважины выбранным типоразмером будем дополнительно учитывать регрессионной моделью вида:

$$T^0(k) = T^0 \left[ 1 - a_c(1) \cdot v_c(1, k) - a_c(2) v_c(2, k) - a_c(3) v_c(3, k) \right], \quad (6)$$

где  $T^0$  – базовый потенциал периода наработки на отказ изделия группы – устанавливается для наиболее технологически совершенных, наиболее ликвидных типоразмеров в диапазоне средней производительности  $q^0(k) \in (q_L, q_R)$  при ограниченном наборе напорных ступеней  $h^0(k) \leq h_M$ . Выход за объявленные пределы  $\langle q_L, q_R, h_M \rangle$  уменьшает потенциал периода наработки на отказ с распределёнными значениями интенсивностей снижений  $a_c(1), a_c(2), a_c(3)$  по каждому отклонению:

$$v_c(1, k) = \left( \frac{h^0(k)}{h_M} - 1 \right)_+, \quad v_c(2, k) = \left( 1 - \frac{q^0(k)}{q_L} \right)_+,$$

$$v_c(3, k) = \left( \frac{q^0(k)}{q_R} - 1 \right)_+.$$

Учитывая индивидуальную зависимость вектора чувствительности факторов износа для моделей ресурса (3), (5)  $\alpha_N$  от номера рассматриваемой группы, приходим, с учётом (6), к объединённой записи модели динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН для  $k$ -й скважины группы с неявной формой оценки времени отказа

$$T(k) = \arg \left\{ T^0(k) = \Delta E(k, t) + \alpha_N^T V(k, t) \right\},$$

где  $\Delta E(k, t)$  и  $V(k, t)$  – относительный объём освоенной энергии и накопленные действия эксплуатационных факторов износа модели (3) на момент отказа  $T(k)$   $k$ -й установки в группе.

Пусть  $T_A$  – априорно заданная оценка периода наработки на отказ  $T^0$ , а

$$\tilde{y}(k) = \Delta E(k)/T(k) \text{ и } \tilde{v}_N(k) = V(k)/T(k)$$

– осреднённые на периоде  $T(k)$  энергетические показатели работы и износа. Тогда искомое представление приведённой выше комплексной модели ресурса приобретает стандартный регрессионный блочный вид

$$-\tilde{y}(k) = \alpha_c^T v_c(k) + \alpha_N^T \tilde{v}_N(k) = \alpha_E^T \tilde{v}_E(k) \quad (7)$$

где, согласно (4), параметры и регрессоры блока эксплуатации дополняются первым элементом

$$\alpha_N(j)^T = [a_N(0) \ a_N(1) \dots \ a_N(5)], \quad a_N(0) = T^0/T_A,$$

$$\tilde{v}_N(k)^T = [v_N(0, k) \ \tilde{v}_N(1, k) \dots \ \tilde{v}_N(5, k)],$$

$$v_N(0, k) = -T_A/T(k),$$

а векторы параметров и регрессоров блока комплектации (6) имеют вид

$$\alpha_c^T = \frac{T^0}{T_A} [a_c(1) \ a_c(2) \ a_c(3)],$$

$$v_c(k)^T = \frac{T_A}{T(k)} [v_c(1, k) \ v_c(2, k) \ v_c(3, k)].$$

Отсюда следует.

**Утверждение.** Пусть по результатам контроля режимных состояний эксплуатации силовых установок выделенной равно-надёжной группы при априорно заданных для группы настройках периода наработки на отказ  $T_A$ , параметрах факторных функций комплектаций (6)  $\langle q_{\min}, q_{\max}, h_M \rangle$  и износа (рис. 1) для множества  $k \in K$  скважин сформированы данные, соответствующие значениям регрессоров  $\tilde{v}_E(k)^T = [\tilde{v}_E(k)^T \ | \ \tilde{v}_N(k)^T]$  модели ресурса (7) на полном жизненном цикле  $T(k)$  работы ЭЦН.

Тогда типовая процедура расчёта оценок  $\hat{\alpha}_E(j)$  параметров модели ресурса (7) выделенной группы  $\alpha_E^T = [\alpha_c^T \ | \ \alpha_N^T]$  по методу наименьших квадратов (МНК) [18] сводится к решению системы уравнений

$$F_E \hat{\alpha}_E = \mathbf{b}_E,$$

$$F_E = \sum_{k \in K} \mu(k) \cdot \tilde{v}_E(k) \cdot \tilde{v}_E(k)^T,$$

$$\mathbf{b}_E = - \sum_{k \in K} \mu(k) \cdot \tilde{y}(k) \cdot \tilde{v}_E(k), \quad (8)$$

в которой весовые коэффициенты  $\mu(k) \in [0; 1]$  отражают значимость и меру соответствия данных по  $k$ -й скважине выделенной группы.

#### Информативность факторов

В отличие от моделей математической физики, отражающих фундаментальные законы строения материального мира, факторное описание связей и процессов сложноорганизованных технических систем, по логике построения, носит приближённый характер и отражает наблюдаемые на практике устойчивые закономерности поведения.

Возможное расширение учётного множества факторов износа  $\tilde{v}_N(k)$  и детализация описания его компонент для повышения точности прогноза периода наработки на отказ в рамках рассматриваемой схемы линейного регрессионного анализа должно соотноситься с наблюдаемой информативностью используемых факторных функций, что напрямую связано с многообразием режимных условий эксплуатации контролируемых скважин непрерывного фонда. Учёт информативности выборки данных по векторам  $\tilde{v}_E(k)$ ,  $k \in K(j)$  и, как следствие, контроль устойчивости получаемых параметрических оценок возможен посредством решения задачи МНК (8) методом ортогонального разложения [23].

Если располагаемый объём промысловых данных о комплектациях и режимах эксплуатации скважин в группе позволяет выделить подгруппы объектов  $k \in K(l)$ , обустроенных одинаковыми (близкими) типоразмерами ЭЦН с единими потенциалами периода наработки на отказ  $T^0(l)$ , где  $l$  – идентификатор типоразмера, то задача параметрического оценивания комплексной модели (7)

может быть разделена на две более простые, с раздельным оцениванием параметров эксплуатационного блока и блока комплектаций. В условиях стационарности, когда выполнено:  $\tilde{y}(k) = y(k)$ ,  $\tilde{\mathbf{v}}_N(k) = \mathbf{v}_N(k)$ , а  $T^0(l)$  – единое значение периода наработки на отказ для  $l$ -й подгруппы, ресурсная модель эксплуатационного блока может быть выделена и представлена соотношением

$$-y(k) = \mathbf{a}_N^T \mathbf{v}_N(k) + \xi(k), \quad k \in K(l) = \{1, 2, \dots, k(l)\}, \quad (9)$$

где  $\xi(k)$  – случайный фактор (ошибок представления и измерений) с нулевым средним,  $K(l)$  – реиндексированное для подгруппы  $l$  множество факторных данных, а вектор параметров  $\boldsymbol{\alpha}_N^T = [\alpha_N(0) \alpha_N(1) \dots \alpha_N(5)]$  с точностью до первой компоненты  $\alpha_N(0) = T^0(l)/T_A$  соответствует вектору  $\mathbf{a}_N$  в (7).

Представим модель (9) как линейную форму векторов компонент регрессора размерностью  $k(l)$ :

$$\begin{aligned} -y &= \alpha_N(0)\mathbf{w}(0) + \alpha_N(1)\mathbf{w}(1) + \\ &+ \alpha_N(2)\mathbf{w}(2) + \alpha_N(3)\mathbf{w}(3) + \dots \\ &+ \alpha_N(4)\mathbf{w}(4) + \alpha_N(5)\mathbf{w}(5) + \xi, \end{aligned} \quad (10)$$

где, согласно (7) и (9),  $\alpha_N(i)$ ,  $i \in \{0, 1, \dots, 5\}$  – компоненты вектора  $\boldsymbol{\alpha}_N$ ,  $\mathbf{y} = [y(1) y(2) \dots y(k(l))]^T$  – вектор выходов;  $\xi = [\xi(1) \dots \xi(k(l))]^T$  – вектор случайных факторов, а  $\mathbf{w}(0) = [-w(0,1) \dots w(0,k(l))]^T$  и  $\mathbf{w}(i) = [v(i,1) \dots v(i,k(l))]^T$ ,  $i \in \{0, 1, 2, \dots, 5\}$  – векторные компоненты регрессоров. Анализ информативности факторов связан с переходом от координат разложения  $\langle \mathbf{w}(i), i \in \{0, 1, 2, \dots, 5\} \rangle$  выхода  $y$ , к координатам ортонормированного базиса  $\langle \mathbf{z}(j_i), i \in \{0, 1, 2, \dots, 5\} \rangle$  по процедуре Грама–Шмидта [23] и новому представлению модели (10) в виде

$$-y = c(j_0)\mathbf{z}(j_0) + c(j_1)\mathbf{z}(j_1) + \dots + c(j_5)\mathbf{z}(j_5) + \xi. \quad (11)$$

Управление порядком перебора в схеме ортогонализации по методу ведущего элемента [24] позволяет упорядочить информационную значимость факторов по энергетическим уровням оценок спектра

$$\begin{aligned} \{\hat{c}(j_0)^2 \geq \hat{c}(j_1)^2 \geq \dots \geq \hat{c}(j_5)^2\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \{\mathbf{w}(j_0) \succ \mathbf{w}(j_1) \succ \dots \succ \mathbf{w}(j_5)\}, \end{aligned}$$

получаемых согласно (11) в условиях ортонормированности векторов  $\mathbf{z}(j_i)$ :  $\|\mathbf{z}(j_i)\|=1$ ,  $\mathbf{z}(j_i)^T \mathbf{z}(j_i)=0$ , при  $i \neq l$  по выражению

$$\hat{c}(j_i) = -\mathbf{y}^T \mathbf{z}(j_i), \quad i \in \{0, 1, 2, \dots, 5\}. \quad (12)$$

Возможный относительно низкий уровень оценки наименьшего спектра ортогонального ряда (11)

$$\mu_C(j_5) = \hat{c}(j_5)^2 / \sum_0^5 \hat{c}(j_i)^2 \leq \mu_C^{LIM} \quad (13)$$

свидетельствует, что вектор  $\mathbf{w}(j_5) = [v(j_5,1) \dots v(j_5,k(l))]^T$  исходной формы представления модели ресурса (10) с переупорядоченной суммой

$$\begin{aligned} -y &= \alpha_N(j_0)\mathbf{w}(j_0) + \alpha_N(j_1)\mathbf{w}(j_1) + \dots \\ &+ \alpha_N(j_4)\mathbf{w}(j_4) + \alpha_N(j_5)\mathbf{w}(j_5) + \xi \end{aligned} \quad (14)$$

с хорошим приближением описывается линейной формой векторов  $\langle \mathbf{w}(i), i \in \{0, 1, 2, \dots, 4\} \rangle$  с более высокими уровнями спектра. Переход к упрощенному описанию

модели эксплуатационного ресурса (9), (14) с исключением фактора  $\mathbf{w}(j_5) = [v(j_5,1) \dots v(j_5,k(l))]^T$  в малой доле (13) огрубит оценку точности по выходу, зато существенно повысит стабильность оценок «уокороченного» вектора параметров  $[\hat{a}_N(j_0) \hat{a}_N(j_1) \dots \hat{a}_N(j_4)]^T$  модели (14), получаемых на решениях системы уравнений

$$\begin{bmatrix} r(j_0, j_0) & r(j_1, j_0) & \dots & r(j_4, j_0) \\ 0 & r(j_1, j_1) & \dots & r(j_4, j_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & r(j_4, j_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{a}_N(j_0) \\ \hat{a}_N(j_1) \\ \dots \\ \hat{a}_N(j_4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{c}(j_0) \\ \hat{c}(j_1) \\ \dots \\ \hat{c}(j_4) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где коэффициенты матрицы разложения Грама–Шмидта рассчитываются по выражениям:

$$\begin{aligned} r(j_i, j_i) &= \left\| \mathbf{w}(j_i) - r(j_i, j_0)\mathbf{z}(j_0) - r(j_i, j_1)\mathbf{z}(j_1) - \dots \right\|^2, \\ r(j_i, j_l) &= \mathbf{w}(j_i)^T \mathbf{z}(j_l) \quad \text{для } i > l. \end{aligned}$$

#### Примеры и результаты вычислительного анализа

Рассмотренные ниже примеры идентификации параметров эксплуатационного блока факторной модели ресурса ЭЦН носят иллюстративный характер, демонстрирующий работоспособность технологии устойчивого параметрического оценивания с контролем информативности факторных показателей. Положенные в основу анализа сведения о параметрах и режимных состояниях стационарной эксплуатации действующего фонда скважин были использованы для построения адекватных термобарических моделей [25] для пополнения недостающих состояний по мощностям, температурам и давлениям с последующим восстановлением факторных функций ускоренного износа. На основе экспертных настроек вектора параметров  $\alpha_N$  эксплуатационного блока (9) (табл. 1) были спрогнозированы периоды наработок на отказ  $T(k)$ , которые в системе статистических испытаний алгоритма оценивания (12), (15) «зашумлялись» помехой с нулевым средним и регулируемой интенсивностью. В проведённой серии вычислительных экспериментов с «зашумленными» потенциалами периодов наработок на отказ поворялась корректность работы алгоритма ортогонального оценивания на типовых режимах стационарной эксплуатации скважин. Имеющийся объём первичной информации позволил выделить подгруппу из 33 скважин постоянного фонда ( $k(l)=33$ ), обустроенных ЭЦН с близкими номинальными характеристиками по дебиту –  $q^0 \in [45, 50] \text{ (м}^3/\text{сут)}$ , напорам –  $h^0 \in [2400, 2600] \text{ (м)}$ , одной габаритной группой (группа 5), с радиальным типом ступени и ПЭД с близкими номиналами мощностей (45 кВт).

Результаты ортогонализации и итоговые ошибки оценивания, осреднённые по серии из  $nL \geq 100$  статистических испытаний  $l \in L = \{1, 2, 3, \dots, nL\}$  для каждого уровня интенсивности  $\nu_\xi$  действия помехи  $\|\xi(l)\| \leq \nu_\xi \|y(l)\|$ ,  $\nu_\xi \in \{0, 0,01, \dots, 0,1\}$  (для задания случайной помехи используется функция `rand` программной среды Matlab, [26]) по каждому параметру

$$\delta a_N(j_i, \nu_\xi) = \sqrt{\frac{1}{nL} \sum_l \left( (\hat{a}_N(j_i, \nu_\xi) - a_N(j_i)) / a_N(j_i) \right)^2}$$

представлены областями рассеяния суммарной относительной ошибкой по каждой реализации и графиком «средних» по всем реализациям

$$\delta a_N(v_\xi) = \sqrt{\frac{1}{nL} \sum_l \left[ \left( \left( \hat{a}_N(j_0, v_\xi) - a_N(j_0) \right) / a_N(j_0) \right)^2 + \dots \right. \right.} \\ \left. \left. \dots + \left( \left( \hat{a}_N(j_5, v_\xi) - a_N(j_5) \right) / a_N(j_5) \right)^2 \right] }$$

Сопоставление областей рассеяния и их «средних» свидетельствует, что переход на модель с укороченным набором регрессоров за счёт исключения «линейно зависимого» фактора перенапряжения  $\langle w(j_5), z(j_5) \rangle$  переводит задачу идентификации из класса плохо обусловленных [27] в класс корректных с десятикратным сокращением уровня среднеквадратической ошибки параметрического оценивания (рис. 2).

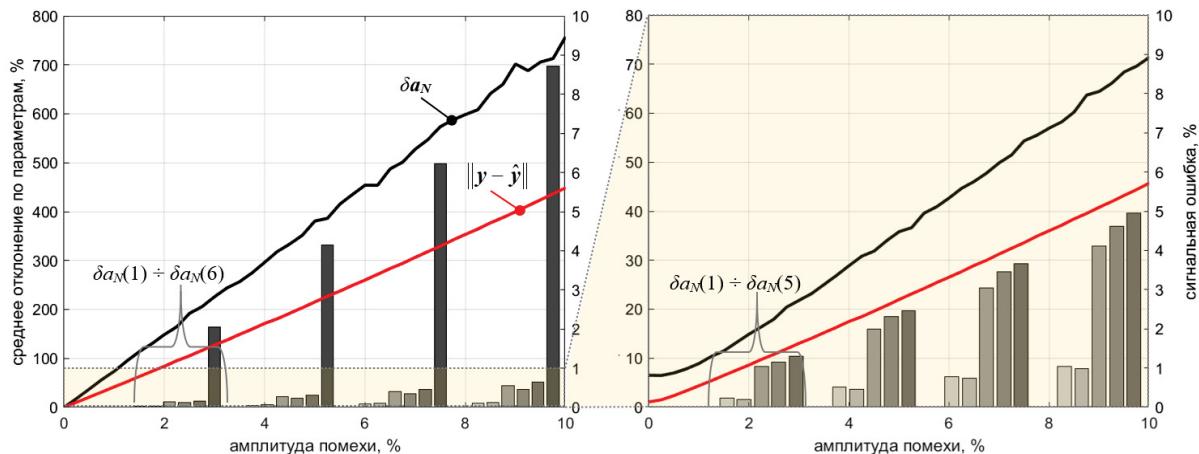
**Таблица 1.** Экспертные настройки параметров эксплуатационной модели ресурса ЭЦН выделенной подгруппы  
**Table 1.** Expert settings of the ESP resource operational model parameters of the selected subgroup

Фактор/Factor													
изгиб конструкции lift bending	отклонение от номинального режима подачи deviation from nominal productivity				перегрев overheating				перегрузка overload		риск пробоя изоляции insulation breakdown risk		
	$a_N(1)$	$\delta q$	$a_N(2)$	$\Theta_{S1}$	$\Theta_{S2}$	$\Theta_{S3}$	$a_\theta$	$\mu_S$	$a_N(3)$	$a_N(4)$	$\delta U$	$a_U$	$a_N(5)$
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5	0,02	—	0,4	80	100	120	2	0,3	0,3	0,2	1,05	2	0,1

**Таблица 2.** Параметры, режимные состояния и восстановленные периоды наработки на отказ для выделенной подгруппы скважин с близкими типоразмерами ЭЦН (фрагмент таблицы данных по 33-м скважинам)

**Table 2.** Parameters, operating variables and restored periods of life for a selected subgroup of wells with similar standard sizes of ESP (a fragment of the data table for 33 wells)

№	Номинальные параметры погружной установки Submersible unit nominal parameters				Параметры пласта, флюида и конструкции Formation, fluid and lift parameters						Режимные состояния Operation states				Период наработки на отказ Run-life period		
	$q^0$	$h^0$	$P_2^0$	$U_1^0$	$H_N$	$H_R$	$p_R$	$\beta$	$p_{G0}$	$G$	$\Theta_R$	$q$	$\omega_N$	$\Theta_S$	$P_2$	$N_2$	$T$
	м <sup>3</sup> /сут m <sup>3</sup> /day	м m	кВт kW	В V	м m	м m	МПа MPa	ед. units	МПа MPa	ед. units	°C	м <sup>3</sup> /сут m <sup>3</sup> /day	ед. units	°C	кВт kW	кВт kW	сут day
1	45	2450	2426	1410	2590	2744	20,9	0,82	9,4	50	78	42	0,94	114	2100	1235	341
2	50	2500	2750	1560	2592	2800	20,2	0,72	9,3	50	80	56	1,04	118	2571	1880	217
3	50	2500	2750	1371	2539	2707	17,9	0,98	9,8	53	83	49	0,91	114	1985	1282	385
4	50	2500	2750	1590	2624	2655	18,1	0,96	9,3	52	78	69	1,05	118	3331	1954	251
5	50	2500	2750	1440	2590	2727	21,9	0,95	9,3	52	81	42	0,96	113	2190	1780	316
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	50	2400	2640	1560	3141	3273	15,8	0,10	7,8	87	92	54	1,04	132	1932	1193	188
32	50	2500	2750	1485	2557	2636	13,6	0,78	8,3	88	90	44	0,99	113	2329	1706	323
33	50	2600	2860	1605	2976	3117	13,2	0,75	8,3	88	90	37	1,07	130	2721	2286	142



**Рис. 2.** Графики параметрических и сигнальных ошибок оценивания в зависимости от уровня помех для схем оценивания шести (слева) и пяти (справа) параметров модели ресурса

**Fig. 2.** Parametric and signal estimation errors charts according to the noise level for identification schemes of six (on the left) and five (on the right) parameters of the resource model.

### Выводы

1. Развитие и масштабное внедрение систем и средств устьевой и глубинной телеметрии и частотного регулирования подачи в практику контроля и управления технологиями нефтедобычи создают реальную основу построения новых оптимальных реше-

ний для скважин с ЭЦН [15, 22, 25]. Явная связь функциональных и ресурсно-энергетических показателей комплексной модели ЭЦН позволяет формировать оптимальные пропорции между производительностью, долговечностью и энергопотреблением силового оборудования как на этапе выборе

- режима и параметров обустройства скважины, так и в период её реальной эксплуатации.
2. Введённое поле признаков ускоренного старения и износа: «деформации и трение при заглублении – неноминаль производительности – перегрев – перегруз по мощности – перенапряжение» отражают обсуждаемый [28, 29] опыт эксплуатации скважин непрерывного фонда. Системный шаблон линейной регрессии, как и сама концепция факторного анализа, аппроксимирует сложноорганизованные связи и процессы в виде линейных форм первого приближения. Модели подобного класса ориентированы на задачи адаптивной оптимизации режимов эксплуатации скважин в условиях реального времени. Упрощенный характер описания позволяет реализовывать и сопровождать такие модели в рамках информационных ресурсов подсистем по месту сбора первичной информации.
  3. В отличие от фундаментальной математической физики старения и износов, актуализация факторных моделей технических систем основана на решении обратных задач для параметров чувствительности выделенных факторов по данным промыслового контроля режимов эксплуатации на полном жизненном цикле работы ЭЦН. Обеспечение устойчивости параметрических оценок, связанное с информативностью сложно формируемого вектора факторных признаков, трудно гарантировать ещё и потому, что желаемый уровень значимости факторов зависит от многообразия режимных состояний и параметров кривизны стволов исследуемой пологруппы скважин, обустроенных однотипным по типоразмерам и надёжности оборудованием.
  4. Спектральное ранжирование и последующая адаптация размерности регрессии с выделением только информационно значимых факторов по методу ортогонализации с ведущим элементом контролирует статистическую устойчивость параметрических
  - оценок на обучающей выборке данных выделенной подгруппы скважин. Отbrasывание малоинформационного фактора, как, например, «перенапряжение»  $w(5)=[v(5,1)\dots v(5,k(l))]^T$  модели регрессии (14), свидетельствует, что действие данного фактора на представленной выборке режимных состояний хорошо воспроизводится линейной комбинацией факторов «заглубление»  $w(1)$  и «перегруз»  $w(4)$ . Однако это не означает, что перенапряжение малозначимо в учёте динамики старения изоляции. Возможно, что на других обучающих выборках данных этой же подгруппы или иных подгрупп первичные режимы эксплуатации определят большую значимость динамики старения от перенапряжения.
  5. Изложенная схема факторного контроля динамики старения и износа ЭЦН в условиях непрерывной эксплуатации есть пример возможной реализации данного подхода на практике. За рамками исследований остался ряд нерешённых задач. Среди них:
    - кластеризация параметров и данных режимов эксплуатации скважин на полных жизненных циклах работы ЭЦН с формированием равнотипных групп и подгрупп одинаковых или близких типоразмеров, иными словами, типизация моделей ресурсов с адекватной группировкой обучающих выборок первичных данных.
    - расширение и/или реконструкция факторных функций старения и износа для скважин с особыми режимами эксплуатации, например, введение фактора динамики и количества повторных пусков для скважин периодического фонда.
    - реконструкция и/или детализация описания факторных функций старения с разработкой вторичных процедур настроек их параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Takacs G. Electrical submersible pumps manual. 2<sup>nd</sup> ed. – Cambridge: Gulf Professional Publ. Elsevier, 2017. – 578 p.
2. Petroleum engineering handbook. V. IV: Production operations engineering / Ed. by J. Dunn Clegg. – Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2007. – 900 p.
3. Submersible Pump Handbook. 10th ed. – Claremore: Baker Hughes, 2011 – 278 p.
4. Babiker M., Tajeldin A., Abubakr A. ESP reliability statistical modelling using Weibull analysis, case study from Sudan // SPE Middle East artificial lift conference and exhibition. – Bahrain, 2018. URL: <https://doi.org/10.2118/192468-MS> (дата обращения 10.06.2022).
5. Al-Jazzaf A.M., Pandi A., Nora Al-M. Interpretation of ESP reliability using Weibull analysis and dynamic run life analysis // SPE Gulf coast section electric submersible pumps symposium. – USA, 2019. URL: <https://doi.org/10.2118/194393-MS> (дата обращения 10.06.2022).
6. Qahtani A.M., Qahtani M.A. Field-validated models for predicting electric submersible pump run life in Saudi Fields. SPE Middle East artificial lift conference and exhibition. – Kingdom of Bahrain, 2016. URL: <https://doi.org/10.2118/184173-MS> (дата обращения 10.06.2022).
7. Dowling M. Reality vs. expectations for ESP reliability analysis // SPE Gulf coast section electric submersible pumps symposium. – USA, 2019. URL: <https://doi.org/10.2118/194398-MS> (дата обращения 10.06.2022).
8. Celemín A., Estupiñan D.A., Ricardo N. Model comparison for ESP run-life prediction: classic statistics vs. machine learning // SPE annual technical conference and exhibition. – UAE, 2021. URL: <https://doi.org/10.2118/206028-MS> (дата обращения 10.06.2022).
9. Unlocking the potential of electrical submersible pumps: the successful testing and deployment of a real-time artificially intelligent system, for failure prediction, run life extension, and production optimization / M. Al Radhi, F.A. Bermudez, W. Al Madhoun, K. Al Blooshi, N.N. Al Nahhas, N.S. Mohammed // SPE symposium: artificial intelligence - towards a resilient and efficient energy industry. 2021. URL: <https://doi.org/10.2118/208647-MS> (дата обращения 10.06.2022).
10. Reda El Mahbes, Wilfried Manfoumbi, Benedicte Kadio-Morokro. Real-time remote monitoring to enhance electrical submersible pump system run life and maximize production // SPE middle east artificial lift conference and exhibition. – Bahrain, 2018. URL: <https://doi.org/10.2118/192470-MS> (дата обращения 10.06.2022).
11. Abdelaziz M., Lastra R., J.J. Xiao. ESP data analytics: predicting failures for improved production performance // Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference. – UAE, 2017.

- URL: <https://doi.org/10.2118/188513-MS> (дата обращения 10.06.2022).
12. Successful standardization and sustainable well management system for ESP well surveillance & optimization across PDO / A. Al-Bimani, R. Kulkarni, H. Al-Muqbali et al. // SPE Electric Submersible Pump Symposium. – USA, 2017. URL: <https://doi.org/10.2118/185135-MS> (дата обращения 10.06.2022).
  13. Филиппов В.Н. Надежность установок погружных центробежных насосов для добычи нефти. Насосостроение. Серия ХМ-4. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1983. – 50 с.
  14. Соловьев И.Г., Конопелько В.К. Линейная модель ресурса погружного электроприводного насоса // НТЖ Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 1987. – № 6. – С. 7–10.
  15. Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Оптимизация параметров обустройства и режима эксплуатации скважины с ЭЦН в условиях осложнений // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2019. – № 9 (554). – С. 28–35. URL: [https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9\(554\)-28-35](https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9(554)-28-35) (дата обращения 10.06.2022).
  16. Уразаков К.Р., Алиметов Ш.А., Тугунов П.М. Исследование эффективности выноса воды и механических примесей с забоя нефтяных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 77–85. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3025> (дата обращения 10.06.2022).
  17. Деговцов А.В. Анализ причин отказов УЭЦН при эксплуатации в осложненных условиях // Инженерная практика. – 2017. – № 9. URL: <https://glavteh.ru/разрушение-вала-уэнци-причины/> (дата обращения 10.06.2022).
  18. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применения. – М.: Наука, 1986. – 548 с.
  19. Соловьев И.Г., Субарев Д.Н. Управление параметрами обустройства и режимом эксплуатации скважины с погружным электронасосом // НТЖ Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2012. – № 7. – С. 15–21.
  20. Мельниченко В.Е. Оценка влияния основных технологических характеристик добывающих скважин на ресурс погружных электроприводных насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2018. – 24 с.
  21. Сарачева Д.А., Вахитова Р.И., Уразаков К.Р. Зависимость теплового состояния электроприводного насоса от частоты вращения двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 103–110. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2406> (дата обращения 10.06.2022).
  22. Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Ресурсно-энергетическая эффективность обустройства скважин с частотно-регулируемой подачей насоса // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 16. – С. 60–72. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/6/3236> (дата обращения 10.06.2022).
  23. Голуб Дж., Ван-Лоун Ч. Матричные вычисления. – М.: Мир, 1999. – 548 с.
  24. Соловьев И.Г., Распопов Р.В. Техника зонального редуцирования гидродинамической модели нефтяного коллектора // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26. – № 4. – С. 21–32.
  25. Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Цибульский В.Р. Идентификация гидродинамической модели скважины с электроприводным насосом по данным контроля возмущённых режимов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 181–192. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/5/2649> (дата обращения 10.06.2022).
  26. MATLAB & Simulink – MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения 10.06.2022).
  27. Albert A. Regression and the Moore–Penrose pseudoinverse. – Cambridge: Academic Press, 2012. – 194 p.
  28. Влияние на наработку установок электроприводных центробежных насосов подачи и частоты вращения насоса при эксплуатации скважин, осложненных выносом механических примесей / В.Н. Ивановский, А.В. Деговцов, А.А. Сабиров, С.В. Кривенков // Территория Нефтегаз. – 2017. – № 9. – С. 58–64.
  29. Хабибуллин М.Я. Исследование механизма разрушения призабойной зоны пласта фильтрационным потоком пластовой жидкости и предотвращение пробообразования // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 86–94. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3397> (дата обращения 10.06.2022).

Поступила 15.06.2022 г.

### Информация об авторах

**Соловьев И.Г.**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр СО РАН; доцент, Тюменский индустриальный университет.

**Говорков Д.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетических систем, Тюменский Индустриальный университет.

**Константинов И.В.**, аспирант кафедры кибернетических систем, Тюменский Индустриальный университет.

UDC 622.279:681.5

## ESTIMATION OF ESP OPERATIONAL RESOURCE DYNAMICS USING FACTOR-BASED MODEL

**Ilya G. Solovyev<sup>1,2</sup>,**  
igsolovyev123@gmail.com

**Denis A. Govorkov<sup>2</sup>,**  
dagovorkov@mail.ru

**Ivan V. Konstantinov<sup>2</sup>,**  
ivkonstantinov95@yandex.ru

<sup>1</sup> Tyumen Scientific Centre SB RAS,  
86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russia.

<sup>2</sup> Tyumen Industrial University,  
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

**The relevance** of the study is related to the search of the approaches to increase the control efficiency for the operation processes of wells equipped with electric submersible pumps. Dynamics of pump operational resource usage can be estimated on the basis of factorial model construction and identification according to control data of the power unit during its life run to failure. Unlike the models based on the fundamental physics of insulation aging and mechanical wear, the introduced simplified description of the resource development dynamics reflects the relationship between the operating lifetime and the well-known factors that reduce operational reliability in general for the entire submersible unit.

**The main scope:** formalization of the electric submersible pumps continuous operation resource model in dynamics and formalization of resource estimation and submersible unit accelerated wear factors; development of the parametric estimation algorithm of the resource model operational block with control over the calculation correctness according to the operating modes data information content of a selected group of wells.

**Object:** electric submersible pumps-equipped wells with continuous operating modes.

**Methods:** thermobaric modeling of variable states of well systems and regression estimation of the operational resource consumption dynamics; analysis of the continuous operating modes control data of a selected subgroup of wells equipped with electric submersible pumps with similar run life potentials; structural-parametric estimation of the resource model operational block with information content assessment of the regression variables in the orthogonal decomposition scheme.

**Research results and summary.** Consumption estimation of the accumulated energy potential (resource) initially founded by the submersible unit manufacturer makes it possible to predict its run-life considering the effects of accelerated aging and wear factors. Allocating units structurally similar in design and standard sizes in equal run-life clusters allows focusing the identification problem of the operational block of the regression resource model with further additional detailing of its structural block. The information content control of the wear dynamics factors based on the orthogonal decomposition of regression equation by the method of the leading element makes it possible to correct the factor set dimension to ensure the stability of the required parametric estimates. The example of statistical tests on operation control data for a subgroup of 33 wells shows that the reduction of the uninformative factor «overvoltage» in identification scheme leads to the significant decrease in the parametric estimation error. The obtained results can serve as a theoretical and methodological basis for creating an adaptive system for monitoring the resource usage dynamics of electric submersible pumps-equipped wells with continuous operating modes and optimization of submersible unit selection, operation and maintenance.

### Key words:

Model, wear factors, resource, run-life potential, electric submersible pump, well, regression analysis, identification, orthogonal estimation.

### REFERENCES

1. Takacs G. *Electrical submersible pumps manual*. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge, Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2017. 578 p.
2. *Petroleum engineering handbook*. Vol. IV: Production operations engineering. Ed. by J. Dunn Clegg. Richardson, Society of Petroleum Engineers, 2007. 900 p.
3. *Submersible Pump Handbook*. 10<sup>th</sup> ed. Claremore, Baker Hughes, 2011. 278p.
4. Babiker M., Tajeldin A., Abubakr A. ESP reliability statistical modelling using Weibull analysis, case study from Sudan. *SPE Middle East artificial lift conference and exhibition*. Bahrain, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/192468-MS> (accessed 10 June 2022).
5. Al-Jazzaf A.M., Pandi A., Nora Al-M. Interpretation of ESP reliability using Weibull analysis and dynamic run life analysis. *SPE Gulf coast section electric submersible pumps symposium*. USA, 2019. Available at: <https://doi.org/10.2118/194393-MS> (accessed 10 June 2022).
6. Qahtani A.M., Mubarak A.Q. Field-validated models for predicting electric submersible pump run life in Saudi Fields. *SPE Middle East artificial lift conference and exhibition*. Kingdom of Bahrain, 2016. Available at: <https://doi.org/10.2118/184173-MS> (accessed 10 June 2022).
7. Dowling M. Reality vs. expectations for ESP reliability analysis. *SPE Gulf coast section electric submersible pumps symposium*. USA, 2019. Available at: <https://doi.org/10.2118/194398-MS> (accessed 10 June 2022).
8. Celemín A., Estupiñan D.A. Ricardo N. Model comparison for ESP run-life prediction: classic statistics vs. machine learning. *SPE annual technical conference and exhibition*. UAE, 2021. Available at: <https://doi.org/10.2118/206028-MS> (accessed 10 June 2022).
9. Al Radhi M., Bermudez F.A., Al Madhoun W., Al Blooshi K., Al Nahhas N.N., Mohammed N.S. Unlocking the potential of electrical submersible pumps: the successful testing and deployment of a real-time artificially intelligent system, for failure prediction, run life extension, and production optimization. *SPE symposium: arti-*

- ficial intelligence – towards a resilient and efficient energy industry. 2021. Available at: <https://doi.org/10.2118/208647-MS> (accessed 10 June 2022).
10. Reda El Mahbes, Wilfried Manfoumbi, Benedicte Kadio-Morokro. Real-time remote monitoring to enhance electrical submersible pump system run life and maximize production. *SPE middle east artificial lift conference and exhibition*. Bahrain, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/192470-MS> (accessed 10 June 2022).
  11. Abdelaziz M., Lastra R., Xiao J.J. ESP data analytics: predicting failures for improved production performance. *Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference*. UAE, 2017. Available at: <https://doi.org/10.2118/188513-MS> (accessed 10 June 2022).
  12. Al-Bimani A., Kulkarni R., Al-Muqbali H. Successful standardization and sustainable well management system for ESP well surveillance & optimization across PDO. *SPE Electric Submersible Pump Symposium*. USA, 2017. Available at: <https://doi.org/10.2118/185135-MS> (accessed 10 June 2022).
  13. Filippov V.N. *Nadezhnost ustanovok pogruznykh tsentrobeznykh nasosov dlya dobychi nefti* [Reliability of submersible centrifugal pumps units for oil production]. Moscow, CINTI-HIMNEFTEMASH Publ., 1983. 50 p.
  14. Solovyev I.G. Konopelko V.K. Lineynaya model resursa pogruzhnogo elektrotsentrobezhnogo nasosa [Linear model of the resource of a submersible electric centrifugal pump]. *Avtomatzatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz v neftyanoy promyshlennosti*, 1987, no. 6, pp. 7–10.
  15. Solovyev I.G., Konstantinov I.V., Govorkov D.A. Optimization of equipment parameters and a well operational mode with ESP under conditions of complications. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2019, no. 9 (554), pp. 28–35. In Rus. doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9(554)-28-35
  16. Urazakov K., Alimetov S., Tugunov P. Investigation of the efficiency of removal of water and mechanical impurities from the bottom of oil wells *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 333, no. 10, pp. 77–85. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3025> (accessed 10 June 2022).
  17. Degovcov A.V. Analiz prichin otkazov UECN pri ekspluatacii v oslozhnennykh usloviyakh [Analysis of the ESP failures causes during operation in complicated conditions]. *Inzhenernaya praktika*, 2017, no. 9. Available at: <https://glavteh.ru/разрушение-валуэцн-причины/> (accessed 10 June 2022).
  18. Rao S.R. *Lineinyye statisticheskie metody i ikh primenenie* [Linear statistical methods and their applications]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 548 p.
  19. Solovyev I.G., Subarev D.N. Upravlenie parametrami obustroystva i rezhimom ekspluatatsii skvazhiny s pogruzhnym elektronasosom [Control of completion and operation mode of a well with a submersible electric pump]. *Avtomatzatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz v neftyanoy promyshlennosti*, 2012, no. 7, pp. 15–21.
  20. Melnichenko V.E. *Otsenka vliyaniya osnovnykh tekhnologicheskikh kharakteristik dobivayushchikh skvazhin na resurs pogruzhnykh elektrotsentrobeznykh nasosov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Assessment of the influence of the main technological characteristics of producing wells on the resource of submersible electric centrifugal pumps. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2018. 24 p.
  21. Saracheva D.A., Vakhitova R.I., Urazakov K.R. Dependence of an electric-centrifugal pump heat state on engine rotation frequency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 103–110. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2406> (accessed 10 June 2022).
  22. Solovyev I.G., Konstantinov I.V., Govorkov D.A. Resource-energy efficiency of artificial lift selection for wells with frequency controlled pump. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 16, pp. 60–72. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/6/3236> (accessed 10 June 2022).
  23. Golub J., Van-Lone Ch. *Matrichnye vychisleniya* [Matrix calculations]. Moscow, Mir Publ., 1999. 548 p.
  24. Solovyev I.G., Raspovov R.V. Tekhnika zonalnogo redutsirovaniya gidrodinamicheskoy modeli neftyanogo kollektora [Oil reservoir hydrodynamic model zonal reduction technique]. *Matematicheskoe modelirovaniye*, 2014, vol. 26, no. 4, pp. 21–32.
  25. Solovyev I. G., Govorkov D. A., Tsibulsky V. R. Identification of a well hydrodynamic model with an electric submersible pump using the perturbed operation modes control data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 181–192. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/6/3236> (accessed 10 June 2022).
  26. *MATLAB & Simulink* – MathWorks. Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed 10 June 2022).
  27. Albert A. *Regression and the Moore–Penrose pseudoinverse*. Cambridge, Academic Press, 2012. 194 p.
  28. Ivanovskiy V.N., Degotsov A.V., Sabirov A.A., Krivenkov S.V. Impact upon the running time of electrically driven centrifugal feed pump units and the pump's rotation speed in the course of operation of wells which are complicated by a mechanical impurity outflow. *Oil and Gas Territory*, 2017, no. 9, pp. 58–64. In Rus.
  29. Khabibullin M. Research of a reservoir bottom zone destruction by filtering flow of the formation liquid and prevention of call formation in the well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 86–94. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/6/3236> (accessed 10 June 2022).

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

**Ilya G. Solovyev**, Cand. Sc., associate professor, senior researcher, Tyumen Scientific Centre SB RAS, 86; Tyumen Industrial University.

**Denis A. Govorkov**, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

**Ivan V. Konstantinov**, postgraduate student, Tyumen Industrial University.

УДК 624.139.22

## НАПРЯЖЕНО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБОПРОВОДА, ПРОЛОЖЕННОГО НА УЧАСТКАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Файзуллина Эльвира Венеровна<sup>1</sup>,  
elwira.fajzullina@yandex.ru

Паршикова Мария Андреевна<sup>1</sup>,  
maryparshikowa@gmail.com

Гулин Денис Алексеевич<sup>1</sup>,  
denis.ufa@list.ru

Султанмагомедов Тимур Султанмагомедович<sup>1</sup>,  
tsultanmaga@gmail.com

Султанмагомедов Султанмагомед Магомедтагирович<sup>1</sup>,  
ftt2010@mail.ru

Насибуллин Тимур Ришатович<sup>1</sup>,  
necsapphire@mail.ru

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

**Актуальность.** В статье рассматривается проблема строительства и эксплуатации трубопроводов на участках распространения пучинистых грунтов. Рассматриваемая проблема является актуальной, поскольку одной из основных причин, осложняющих процесс прокладки трубопроводных систем в северных районах, является морозное пучение, заключающееся в многократном увеличении объема влажных грунтов при замерзании. Металл труб подземных магистральных трубопроводов при их эксплуатации на участках распространения пучинистых грунтов подвергается существенным деформациям, происходящим из-за неконтролируемых подвижек грунта вследствие процесса морозного пучения. Данное силовое взаимодействие подземного трубопровода и мерзлого грунта может стать причиной возникновения аварийных ситуаций.

**Цель:** создать 3D-модель взаимодействия трубопровода с мерзлым пучинистым грунтом для того, чтобы имитировать процесс пучения грунта и выявить графическую зависимость напряжений и деформаций, возникающих в трубопроводе, от перемещения грунта.

**Объекты:** участок трубопровода, проложенный на участках распространения пучинистых грунтов.

**Методы.** В процессе исследования была изучена литература и нормативные документы по строительству и эксплуатации сооружений в многолетнемерзлых грунтах и проведен анализ влияния пучинистых грунтов на здания и сооружения, а также проведено моделирование в программном комплексе *Ansys*. В работе анализируется процесс взаимодействия многолетнемерзлых грунтов с подземным трубопроводом в программном комплексе *AnsysWorkbench*.

**Результаты.** Авторами выполнено моделирование процесса пучения грунта и проведена оценка напряженно-деформированного состояния трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов, в программном комплексе *AnsysWorkbench*. С помощью разработанной модели получены и проанализированы значения напряжений и полных деформаций стенки трубы при контакте с мёрзлым грунтом, построена графическая зависимость наблюдаемых величин при усилении процесса пучения и увеличении участка пучения.

### Ключевые слова:

Трубопровод, напряженно-деформированное состояние, пучение, строительство, моделирование.

### Введение

Поставка большей части всего объема добываемых углеводородов потребителям по всей России и за рубеж осуществляется по нефтепроводам и газопроводам. Трубопроводные системы уже сейчас занимают 35 % территории, на которой проживает 60 % населения страны. Основные задачи – свести к минимуму техногенные воздействия в период эксплуатации и ослабить негативное влияние природных факторов на надежность конструкций и безопасность эксплуатации.

В районах Западной Сибири существует необходимость модернизации процессов строительства и эксплуатации трубопроводов для поддержания без-

опасной эксплуатации с минимальным воздействием на окружающую среду, поскольку для северных районов характерны особые климатические условия, которые усложняют процессы строительства и эксплуатации, например, участки распространения мерзлых грунтов [1, 2]. Одной из многочисленных сложностей, связанных с низкими температурами грунтов, является процесс морозного пучения грунта. Различают сезонное и многолетнее пучение, хотя физико-механические процессы, которые их вызывают, и последствия имеют одинаковый характер [3]. При промерзании происходит увеличение грунта в объеме, что вызывает подъем земной поверхности с последующей просадкой при оттаивании [4, 5].

Процессы пучения опасны для трубопровода рядом факторов: неравномерностью проявления по трассе, изменчивостью, связанной с закономерностью климата, почвенно-растительным покровом, а также минералогическим составом и строением промерзающих пород [6, 7]. Неравномерность деформации поверхности в зависимости от мощности слоя промерзания и влажности грунтов достигает больших значений, оказывая на трубопровод большие дополнительные нагрузки. Деформация грунта при многолетнем промерзании превышает деформацию при сезонном пучении из-за возможности миграции влаги к фронту промерзания [8, 9]. Распределение напряжений от пучения в значительной степени зависит от условий вдоль трассы трубопровода. Вероятность сильного пучения грунта может быть определена на основании статистических данных по скважинным образцам, с использованием данных, установленных при картировании. Воздействие сил пучения может приводить к существенным деформациям металла труб, как итог – потеря прочности, а в дальнейшем – неизбежные аварии. В первые годы эксплуатации трубопровода аварии, происходящие вследствие действия морозного пучения, наблюдаются чаще, поскольку строительно-монтажные работы, проводимые в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, приводят к нарушению физико-геологических процессов в грунтах, что, в свою очередь, может вызвать усиление интенсивности процесса пучения [4, 10].

Поскольку многолетнемерзлые грунты в мерзлом состоянии обладают большой несущей способностью, для того чтобы «не травмировать» и не растоплять мерзлые грунты, прокладка трубопроводов, а также строительство в многолетнемерзлых грунтах практически осуществимы только в зимнее время [11]. Помимо этого, прокладка трубопроводов в грунтах данного типа требует применения специальных технологий, строительных машин и механизмов. Но, несмотря на все сложности, протяженность трубопроводов, проложенных на участках распространения многолетнемерзлых грунтов, достигает нескольких тысяч километров [12].

Примерами трубопроводов, прокладка которых была осуществлена на участках распространения мерзлых грунтов, могут служить такие трубопроводы, как: «Заполярье-Пурп», «Грансайкинский трубопровод», «Куюмба-Тайшет», «Сила Сибири».

Исходя из всех особенностей строительства и эксплуатации в данных регионах, можно сделать вывод о том, что еще на этапе проектирования трубопроводной системы важно выявить потенциально опасные участки трассы, на которых возможно действие сил морозного пучения грунта. Кроме этого, требуется применение обоснованных конструктивных решений по обеспечению прочности и устойчивости линейной части трубопроводов, проложенных в данных грунтах [13]. Также необходимо вести постоянный мониторинг состояния трубопровода и его напряженно-деформированного состояния, а также следить за изменением свойств грунтов, в которых проложена труба.

Для наблюдения за поведением трубопровода и оценки изменения его характеристик при контакте с многолетнемерзлыми грунтами возможно применение технологии цифровых двойников. Технология цифровых двойников объединяет физический объект с цифровым миром и описывает цифровую модель киберфизического объекта или технологического процесса. Цифровой двойник – это виртуальная интерактивная копия реального объекта, которая помогает эффективно управлять им и отслеживать его состояние при различных сочетаниях нагрузок [14, 15]. Цифровой двойник представляет собой 3D-модель, которая непосредственно связана с реальным технологическим объектом при помощи различных инженерных приборов и устройств. Также для полного функционирования цифрового двойника необходимо программное обеспечение, которое позволяет обрабатывать, накапливать и анализировать полученные с реального объекта данные.

Для того чтобы создать цифровой двойник участка трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов, прежде всего, необходимо создать 3D-модель, которая будет имитировать трубопровод, находящийся непосредственно в грунте [16]. Для построения 3D-модели был выбран программный комплекс AutoCAD. Исходные данные, использованные для построения модели, представлены в табл. 1.

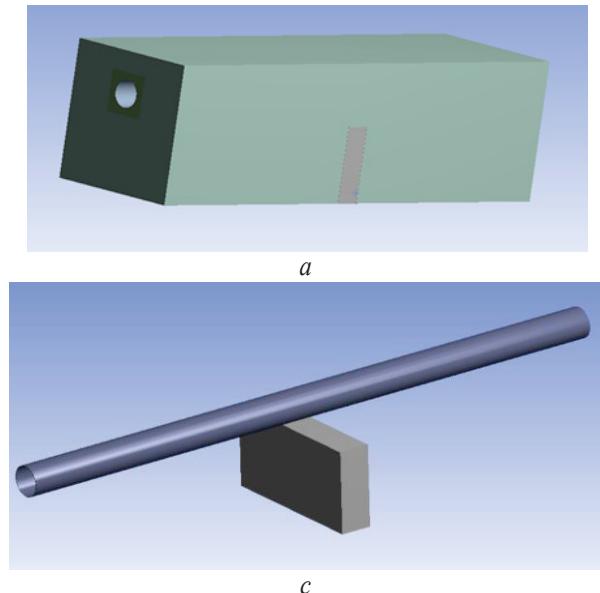
Таблица 1. Исходные данные

Table 1. Source data

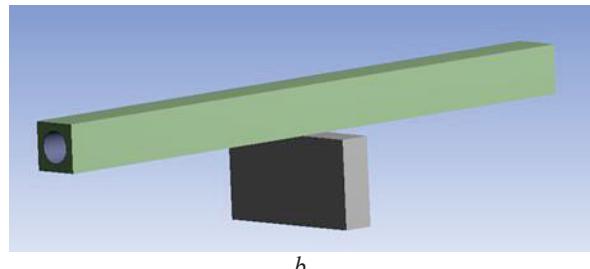
Диаметр Diameter	Толщина стенки Wall thickness	Глубина заложения Depth of laying	Длина участка Plot length	Высота грунтового массива Height of the soil massif	Ширина грунтового массива Width of the soil massif
мм/мм			м/м		
1020	20	1	20	5	5

Разработанная 3D-модель состоит из двух частей: одна часть имитирует мерзлый грунт, вторая – участок трубопровода, проложенный в данном грунте. В ходе построения модели было принято решение о выделении в части модели, имитирующей грунт, небольшого центрального участка, которому было задано перемещение по вертикальной оси с целью получения наиболее реалистичной картины процесса действия морозного пучения грунта на трубопровод. Для выявления зависимости изменения НДС трубопровода от усиления процесса пучения грунта была принята длина данного участка 1 м. В исследовании по определению зависимости НДС трубопровода при увеличении участка пучения грунта длина выделенного участка изменялась с 0 до 5 м с шагом 1 м. Также в процессе построения был выделен небольшой объем грунта, непосредственно окружающий трубу, для того чтобы при дальнейшем выполнении статического анализа методом конечных элементов была возможность задать для него более мелкую сетку, чем для остального объема грунта, с целью получения

наиболее точных значений напряжений и полных деформаций металла трубы.



Модель, созданная в программном комплексе AutoCAD, приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Разработанная 3D-модель: а) общий вид модели; б) выделенные участки грунта с трубой; в) труба с выделенным центральным участком грунта

**Fig. 1.** Developed 3D-model: a) general view of the model; b) selected sections of soil with a pipe; c) pipe with a selected central section of soil

Для расчета и оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода при взаимодействии с многолетнемерзлым грунтом созданная модель на следующем этапе разработки цифрового двойника была импортирована в программный комплекс AnsysWorkbench.

Данный программный комплекс был выбран для расчета и оценки напряженно-деформированного состояния, поскольку его возможности позволяют реалистично смоделировать процесс взаимодействия трубы с грунтом путем задания необходимых свойств составным частям 3D-модели, а также данный программный комплекс даёт возможность проведения конечно-элементного анализа напряженно деформированного состояния модели [17].

После импорта модели в программный комплекс для части, имитирующей трубу, были заданы свойства стали, а для части, выполняющей роль грунта, – свойства, присущие глинистым грунтам [18].

С целью имитации наиболее реального поведения трубопровода при контакте с мерзлым грунтом для части модели, имитирующей грунт, была выбрана модель поведения Мора–Кулона, так как это наиболее распространенная и простая в использовании модель в современной инженерной практике, и она не требует сложного получения исходных данных [19, 20]. Если нет возможности получить все необходимые данные по преобладающим типам грунта для использования усовершенствованных моделей, то следует остановиться на использовании модели Мора–Кулона.

Модель Мора–Кулона определяется пятью входными параметрами [21]:

- модулем общей деформации  $E$ ,  $\text{kH/m}^2$ ;
- коэффициентом Пуассона;
- сцеплением  $c$ ,  $\text{kH/m}^2$ ;
- углом трения  $\varphi$ , град;
- углом дилатансии, определяемым исходя из значений угла внутреннего трения и вида грунта.

Данная модель поведения грунта описывает зависимость касательных напряжений, т. е. прочности на сдвиг, от действующих нормальных напряжений.

Свойства пучинистого и непучинистого грунта, используемые в расчете, представлены в табл. 2, 3 соответственно [5, 22].

**Таблица 2.** Свойства пучинистого грунта, использованные в расчете

**Table 2.** Properties of the heaving soil used in the calculation

Плотность, $\text{kg/m}^3$ Density, $\text{kg/m}^3$	Угол трения $\varphi$ , град. Friction angle $\varphi$ , °	Сцепление $c$ , $\text{Н/m}^2$ Cohesion $c$ , $\text{N/m}^2$	Угол дилатанции, град. Dilatancy angle, °	Модуль деформации $E$ , $\text{МПа}$ Modulus of deformation, $E$ , MPa	Коэффициент Пуассона Poisson's Ratio	Степень пучинистости Degree of heaviness
2000	22	28000	5	27	0,37	Сильно-пучинистый Strongly swollen

**Таблица 3.** Свойства непучинистого грунта, использованные в расчете

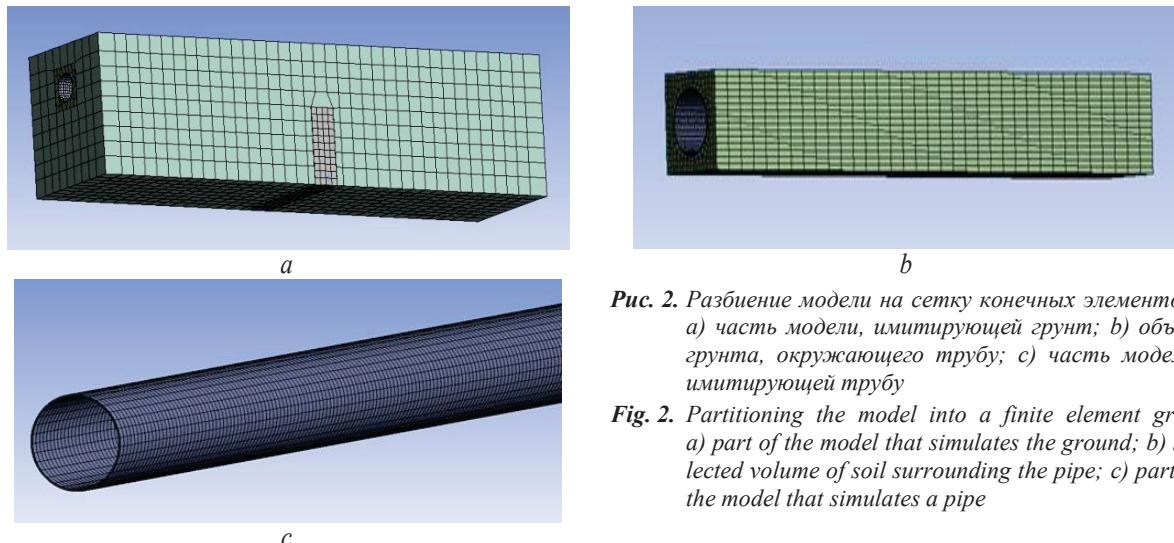
**Table 3.** Properties of the non-heaving soil used in the calculation

Плотность, $\text{kg/m}^3$ Density, $\text{kg/m}^3$	Угол трения $\varphi$ , град. Friction angle $\varphi$ , °	Сцепление $c$ , $\text{Н/m}^2$ Cohesion $c$ , $\text{N/m}^2$	Угол дилатанции, град. Dilatancy angle, °	Модуль деформации $E$ , $\text{МПа}$ Modulus of deformation, $E$ , MPa	Коэффициент Пуассона Poisson's Ratio	Степень пучинистости Degree of heaviness
1600	38	6000	5	48	0,32	Непучинистый Nonfrost-susceptible soil

Для проведения статического анализа методом конечных элементов в программном комплексе AnsysWorkbench полученная модель была разбита на сетку конечных элементов. Для части модели, имитирующей основной массив грунта, была создана грубая сетка, поскольку изменения, происходящие в данной части модели, не оказывают большого влияния на результаты расчета и не несут для нас практической пользы. А для части, вы-

полняющей роль трубы, был выбран Sweep метод построения и задана более мелкая сетка. Также мелкая сетка была задана и для выделенного объема грунта, непосредственно окружающего трубу, поскольку размер конечных элементов трубы и окружающего ее грунта имеет сильное влияние на результаты расчета.

Разбиение модели на сетку конечных элементов представлено на рис. 2.



Число конечных элементов, равное 6350, было подобрано опытным путем. Оно является оптимальным, поскольку дальнейшее уменьшение сетки не приводило к увеличению точности расчета. Измельчение сетки проводилось до тех пор, пока значения, получаемые по результатам расчета, оставались неизменными в пределах 5 %.

После разбиения модели на сетку конечных элементов к ней были приложены нагрузки и заданы закрепления. Было выполнено закрепление торцов модели, а также задано ограничение перемещения боковых сторон по оси  $у$ . Далее было задано внутреннее давление в трубе и вертикальное перемещение центральной части выделенного участка грунта для более наглядной имитации процесса пучения. Приложенные нагрузки и закрепления представлены на рис. 3.

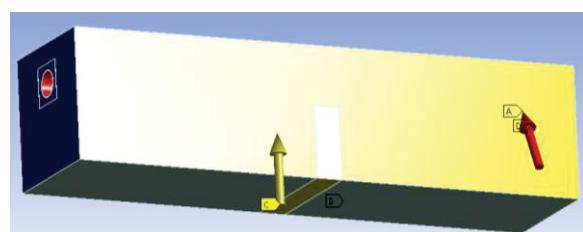


Рис. 3. Нагрузки и опоры, применяемые к модели  
 Fig. 3. Loads and supports applied to the model

Для оценки влияния интенсивности морозного пучения грунта непосредственно на напряженно-деформированное состояние трубы величину перемещения центральной части участка грунта под трубой постепенно увеличивали от 0 до 3000 мм.

Рис. 2. a) Часть модели, имитирующей грунт; b) объем грунта, окружающего трубу; c) часть модели, имитирующей трубу

Fig. 2. Partitioning the model into a finite element grid:  
 a) part of the model that simulates the ground; b) selected volume of soil surrounding the pipe; c) part of the model that simulates a pipe

В результате расчета были получены значения деформаций и напряжений для участка трубопровода, а также наглядная картина процесса пучения грунта, которая была получена с помощью созданной модели благодаря возможностям программного комплекса AnsysWorkbench. Полученная картина пучения грунта представлена на рис. 4.

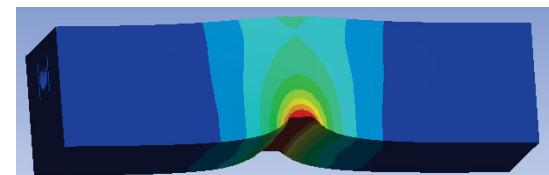


Рис. 4. Картина пучения грунта, полученная с помощью созданной 3D-модели  
 Fig. 4. Picture of soil heaving obtained using the created 3D-model

На рис. 5 представлено измененное состояние части модели, имитирующей трубопровод, при задании перемещения центральному участку грунта с целью моделирования процесса пучения.

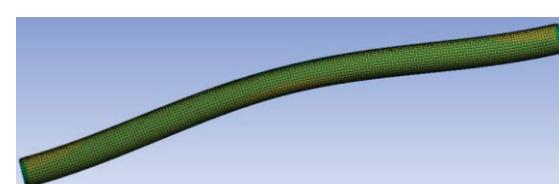


Рис. 5. Состояние трубопровода при настройке движения центральной части земли  
 Fig. 5. State of the pipeline when setting the movements of the central section of the ground

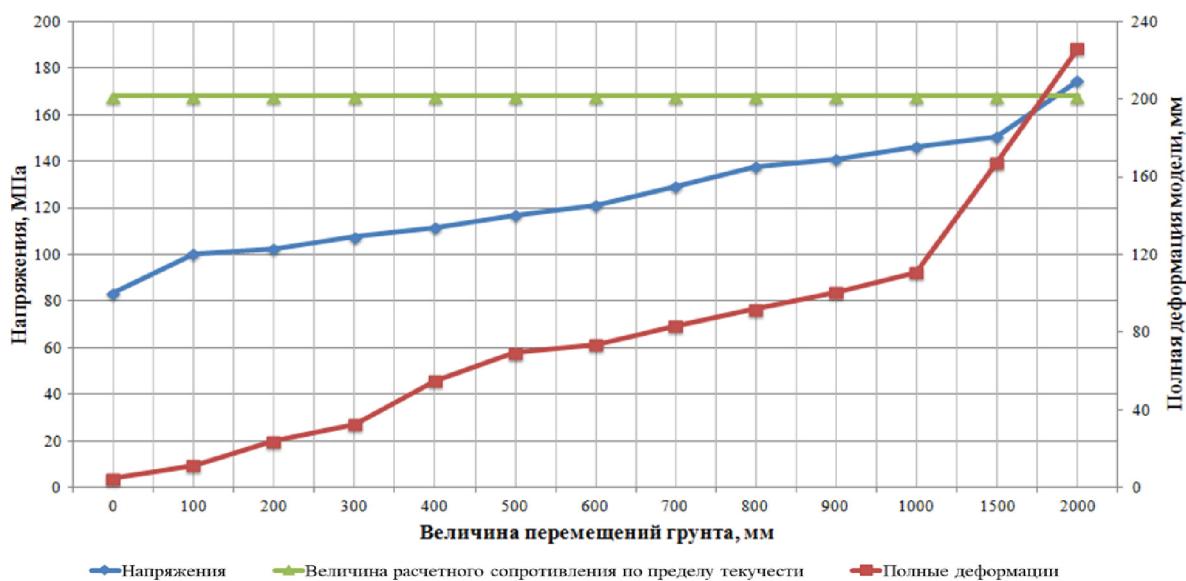
В результате проведения статического анализа напряженно-деформированного состояния созданной 3D-модели в программном комплексе Ansys-Workbench были получены значения, отражающие изменение величины напряжений в трубе и величину полной деформации металла трубы при усилении интенсивности процесса пучения грунта. Усиление интенсивности процесса морозного пучения грунта было смоделировано путем вертикального перемещения ранее выделенного центрального участка модели. Полученные данные приведены в табл. 4.

Графическая зависимость изменения величины напряжений трубопровода и полных деформаций металла трубы от интенсивности процесса морозного пучения грунта с учетом действия внутреннего давления, полученная на основе результатов статического анализа 3D-модели участка трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов, представлена на рис. 6.

**Таблица 4. Изменение величины напряжений и суммарной деформации трубопровода при усилении интенсивности процесса морозного пучения грунта**

**Table 4. Changes in the magnitude of stresses and total deformation of the pipeline with an increase in the intensity of the process of frost heaving of the soil**

Параметр Parameter	Перемещения выделенного участка грунта, мм Movement of the selected area of soil, mm						
	0	100	200	300	400	500	600
Напряжение, МПа Stress, MPa	83,5	100,2	102,4	107,6	111,7	116,9	121,3
Деформация, мм Strain, mm	4,7	11,6	23,9	32,7	55,1	69,4	73,5
Параметр Parameter	Перемещения выделенного участка грунта, мм Movement of the selected area of soil, mm						
	700	800	900	1000	1500	2000	
Напряжение, МПа Stress, MPa	129,4	137,8	140,8	146,3	150,45	174,5	
Деформация, мм Strain, mm	83,4	91,8	100,5	110,9	167,3	226,4	



**Рис. 6. График зависимости изменения величины напряжений и суммарных деформаций трубопровода от интенсивности процесса морозного пучения грунта с учетом действия внутреннего давления**

**Fig. 6. Graph of the dependence of changes in the magnitude of stresses and total deformations of the pipeline on soil frost heaving intensity, taking into account the effect of internal pressure**

По полученным графикам можно видеть, что при изменении величины вертикального перемещения грунта, то есть усиления процесса пучения, от 0 до 2000 мм наблюдается резкий скачок величины полных деформаций на участке от 1000 до 2000 мм, а также скачок напряжений на участке от 1500 до 2000 мм.

По графику видно, что в промежутке от 0 до 1500 мм напряжения медленно и плавно возрастают от 83,5 до 150,45 МПа. На участке от 1500 до 2000 мм происходит скачок напряжений от 150,45 до 174,5 МПа. Необходимо отметить, что для выбранной стали расчетное сопротивление по пределу текучести при этом составляет 168 МПа, а расчетное сопротивление по пределу прочности – 345 МПа.

Поскольку напряжения в стенке трубопровода при вертикальном перемещении центрального участка грун-

та свыше 1800 мм превосходят расчетное сопротивление по пределу текучести, необходимо на более ранних стадиях предотвращать процесс пучения, используя различные средства и методы защиты линейной части трубопровода от деформаций грунтов. Необходимо также осуществлять постоянный мониторинг состояния грунта вокруг потенциально опасных участков.

Величина полных деформаций, наблюдаемых в металле трубы при усилении процесса пучения грунта от 0 до 300 мм, плавно увеличивается от 4,7 до 32,7 мм, далее наблюдается резкий скачок величины деформаций на участке 300–500 мм от 32,7 до 69,4 мм. На участке от 500 до 1000 мм величина полных деформаций плавно возрастает до 110,9 мм. При росте бугра пучения от 1000 до 2000 мм наблюдается резкий скачок деформаций от 110,9 до 226,4 мм. Резкий

скакок деформаций может быть вызван тем, что напряжения, возникшие в стенке при перемещении центрального участка грунта на величину, превышающую 1000 мм, приблизились к значению расчетного предела текучести, а впоследствии превысили его, вследствие этого стенка трубопровода начала деформироваться без постоянно возрастающей нагрузки.

Таким образом, по полученным данным можно сказать, что наиболее опасным является промежуток вертикальных перемещений центрального участка

грунта от 1500 до 2000 мм, так как именно в этом промежутке наблюдается резкий рост как напряжений, так и полных деформаций металла трубы.

Поскольку на общем графике также можно заметить небольшие скачки, наблюдаемые на участке от 0 до 500 мм, приведём график зависимости изменения величины напряжений и полных деформаций трубопровода при изменении величины вертикального перемещения центрального участка модели для данного промежутка. Данный график представлен на рис. 7.

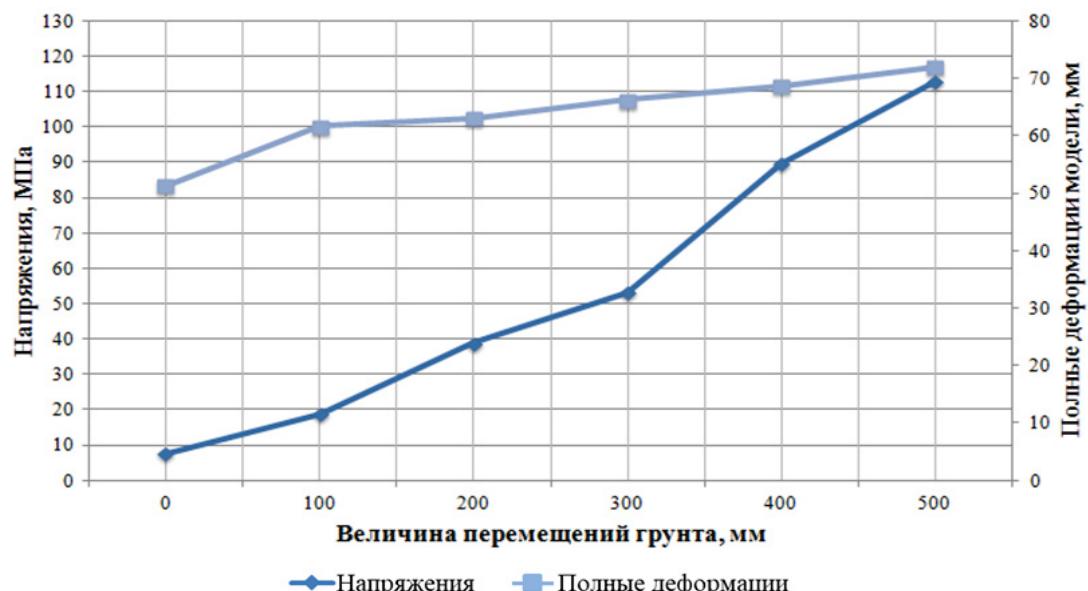


Рис. 7. График зависимости изменения величины напряжений и суммарных деформаций трубопровода при изменении величины вертикального перемещения центрального участка модели от 0 до 500 мм

Fig. 7. Graph of the dependence of the change in the magnitude of stresses and total deformations of the pipeline when the value of the vertical movement of the central section of the model changes from 0 to 500 mm

При изменении величины вертикального перемещения грунта вверх от 0 до 500 мм в промежутке от 0 до 100 мм наблюдается скачок величины полных деформаций от 4,7 до 11,6 мм, далее происходит плавное увеличение значений данной величины до 32,7 мм при вертикальном перемещении, равном 300 мм. Далее наблюдается резкий скачок величины деформаций на участке от 300 до 500 мм с 32,7 до 69,4 мм. При дальнейшем увеличении вертикального перемещения центрального участка грунта, т. е. усилении процесса пучения, стремительный рост величины полных деформаций металла трубы продолжается.

В промежутке от 0 до 100 мм наблюдается скачок напряжений от 83,5 до 100,2 МПа. При дальнейшем усилении процесса пучения до 500 мм значения напряжений остаются практически неизменными и находятся в пределах 100,2–116,6 МПа.

Наличие резких скачков, которые можно видеть на вышеприведённых графиках наблюдаемых величин на рассматриваемых участках, может говорить о потенциальной опасности «точек», в которых наблюдаются скачки. Такими точками являются точки 100 и 1500 мм, так как именно в них происходят резкие увеличения напряжений и деформаций в стенке трубы. Следовательно, необходимо более тщательное

исследование состояния трубопровода именно в этих зонах с целью обнаружения зависимости и механизма возникновения скачков данных величин. Это необходимо для дальнейшего внедрения и применения наиболее эффективных средств защиты трубопровода.

Для исследования зависимости изменения НДС трубопровода от увеличения длины участка пучения в программном комплексе AutoCAD было создано несколько 3D-моделей, в которых были выделены центральные участки грунта разной длины – от 0 до 5 м. При проведении статического анализа методом конечных элементов в программном комплексе AnsysWorkbench центральному участку грунта каждой модели задавалось одинаковое вертикальное перемещение, равное 100 мм. Полученные данные приведены в табл. 5.

По данным результатам была получена графическая зависимость изменения величины напряжений трубопровода и полных деформаций металла трубы от длины участка морозного пучения грунта с учетом действия внутреннего давления в трубе (рис. 8).

По представленным графикам видно, что при увеличении длины участка пучения от 0 до 5000 м напряжения в трубе медленно и плавно возрастают от 83,5 до 115,94 МПа, что не выходит за пределы допустимых значений.

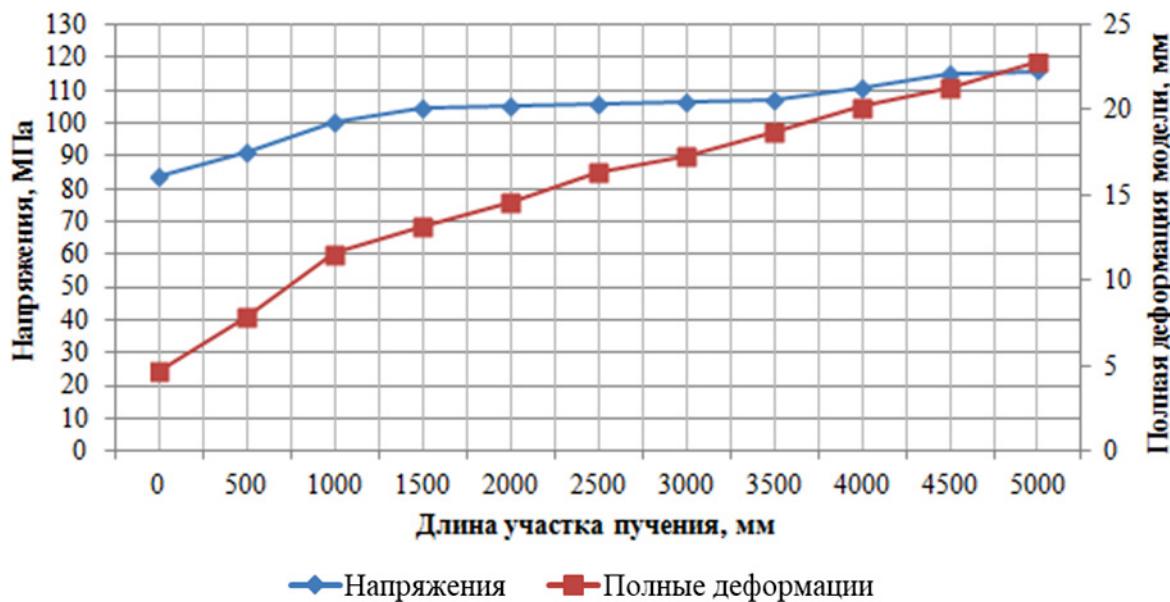


Рис. 8. График зависимости изменения величины напряжений и суммарных деформаций трубопровода от длины участка пучения грунта с учетом действия внутреннего давления

Fig. 8. Graph of the dependence of the change in the magnitude of stresses and total deformations of the pipeline on the length of the soil heaving section, taking into account the effect of internal pressure

**Таблица 5.** Изменение величины напряжений и суммарной деформации трубопровода за счет увеличения длины пучения грунта

Table 5. Changes in the magnitude of stresses and total deformation of the pipeline due to an increase in the length of the soil heaving

Параметр Parameter	Длина участка пучения, мм Heave section length, mm					
	0	500	1000	1500	2000	2500
Напряжение, МПа Stress, MPa	83,5	91,08	100,2	104,7	105,01	105,89
Деформация, мм Strain, mm	4,7	7,9	11,6	13,2	14,6	16,4
Параметр Parameter	Длина участка пучения, м Heave section length, m					
	3000	3500	4000	4500	5000	
Напряжение, МПа Stress, MPa	106,69	107,13	110,54	115,3	115,94	
Деформация, мм Strain, mm	17,3	18,7	20,2	21,3	22,8	

На графике, отражающем величину полных деформаций металла трубы, видно, что при увеличении длины участка пучения от 0 до 1000 мм наблюдается резкий скачок величины деформаций с 4,7 до 11,6 мм. При дальнейшем увеличении длины участка пучения до 5000 мм величина деформаций монотонно возрастает до 22,8 мм без резких скачков.

### Заключение

Исходя из вышеприведенных данных, можно сделать вывод о том, что необходимо постоянно следить за состоянием грунта, в котором проложен трубопровод, чтобы иметь возможность на начальных этапах роста бугра пучения остановить этот процесс и предупредить его негативное влияние на трубу.

Стоит отметить, что по результатам проведённого исследования можно сделать вывод о том, что усиление процесса пучения грунта является наиболее опасным явлением по сравнению с процессом увеличения длины участка пучения. Поэтому на всех этапах эксплуатации трубопроводной системы очень важно не допускать усиления процесса пучения грунта путем применения противопучинистых устройств и методов, направленных на борьбу с этим явлением.

Применение технологии цифровых двойников для моделирования поведения и изменения характеристик трубопровода при контакте с многолетнемерзлыми грунтами позволит осуществлять непрерывный мониторинг напряженно-деформированного состояния трубопровода, а также непрерывно наблюдать за потенциально опасными участками вдоль трассы трубопровода и оценивать влияние возможных негативных факторов на работоспособность трубопроводной системы, что будет способствовать предотвращению возможных аварий [23–24]. Кроме этого, применение данной технологии позволит более подробно и тщательно изучать процессы и явления, которые оказывают негативное влияние на конструкцию трубопроводных систем, что даст возможность подбирать наиболее эффективные методы и средства защиты линейной части магистральных трубопроводов. Помимо этого, данные о влиянии пучинистых грунтов на напряженно-деформированное состояние трубопровода, полученные при помощи цифрового двойника, позволят модернизировать уже известные методы и создать новые технологии и конструкции, применяемые для защиты сооружений, и увеличить надежность и долговечность трубопроводных конструкций, а это, в свою очередь, обеспечит безопасную транспортировку углеводородов в северных районах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Недра», 1986. – 224 с.
- Петров А.М., Сычкова Е.Н. Анализ особенностей расчета подземных трубопроводов на пучинистых грунтах // MASTER'S JOURNAL. – 2020. – № 1. – С. 120–127.
- Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1973. – 448 с.
- Взаимодействие систем трубопроводного транспорта и природной среды // Добыча нефти и газа. 2011. URL: <http://oilroot.ru/component/content/article/85-promyshlennaya-bezopasnost-okhrana-truda-ekologiya-strakhovanie-opasnykh-obektov/354-vzaimovliyanie-sistem-truboprovodnogo-transporta-i-prirodnoj-sredy> (дата обращения 23.02.2022).
- СП 21.13330.2016. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* (с Изменениями № 1, 2, 3). – М.: Стандартинформ, 2019. – 228 с.
- THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application / S. Nishimura, A. Gens, S. Olivella, R.J. Jardine // Geotechnique. – 2009. – № 3. – Р. 159–171.
- Laliberte G.E., Brooks R.H., Corey A.T. Properties of unsaturated porous media // Journal of Irrigation Draining Division. – 1968. – № 94. – Р. 57–75.
- Oswell J.M. Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons 1 // Canadian Geotechnical Journal. – 2011. – V. 48. – № 9. – Р. 1412–1431.
- Boquuocos G.J. Movement of soil moisture from small capillaries to the large capillaries of the soil upon freezing // J. Agriculture Research. – 1923. – V. 24. – Р. 427–431.
- Review of the state of the art: interactions between a buried pipeline and frozen soil / H. Li, Y. Lai, L. Wang, X. Yang, N. Jiang, L. Li, C. Wang, B. Yang // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – V. 157. – Р. 171–186.
- Модель взаимодействия системы «подземный трубопровод – мерзлый грунт» / М.И. Николаева, Р.А. Атласова, С.С. Бердыев, А.Г. Иванов // Арктика XXI век. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 44–50.
- Проблема пучения в трубопроводном строительстве и методы её устранения / Д.А. Гулин, Э.В. Файзуллина, Э.И. Шарипова, А.С. Глазков, М.Э. Дусалимов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 4. – С. 60–73.
- Марков Е.В. Обеспечение проектного положения магистральных трубопроводов в условиях пучинистых грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2020. – 24 с.
- Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, В.М. Марусева, В.Ю. Кулемин // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. – 2019. – № 32. – С. 1–39.
- Анализ влияния отклонений формы емкостного оборудования на величину возникающих максимальных напряжений / Е.Ю. Туманова, Э.Э. Габдурашитова, М.А. Паршикова, Д.О. Толстель, А.Е. Чижов // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы современной науки, достижения и инновации. – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2020. – С. 96–102.
- Паршикова М.А., Файзуллина Э.В., Гулин Д.А. Исследование напряженно-деформированного состояния трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов // Актуальные проблемы науки и техники: XIV Междунар. науч.-практ. конф. молод. ученых. – Уфа: УГНТУ, 2021. – Т. 1. – С. 177–179.
- Mouloud D., Bouthchicha D. Simulation Numérique par ANSYSWorkbench // Fluid Structure Interaction. – 2017. – V. 4. – Р. 65–89.
- Паршикова М.А., Файзуллина Э.В., Гулин Д.А. Разработка цифрового двойника участка трубопровода, проложенного на участке распространения пучинистых грунтов // Нефтегазовый терминал. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 135–139.
- Cheng Z., Damjanac B. Extension of Mohr-Coulomb model considering opening and closure of tension cracks // 55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – ARMA, Houston, Texas, 2021. – С. 1157.
- Mohr-Coulomb model considering variation of elastic modulus and its application / X.Z. Cui, O. Jin, Q.S. Shang, S.T. Liu // Key Engineering Materials. – 2006. – V. 306–308. – Р. 1445–1448.
- Кудашева М.И., Калошина С.В. Сравнение модели Мора–Кулонова и модели упрочняющегося грунта в программном комплексе Plaxis // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 2. – С. 87–95.
- ГОСТ28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. – М.: Стандартинформ, 2013. – 11 с.
- Experimental study of the axial movement of the pipeline in permafrost conditions with changes in soil temperature and humidity / R.N. Bakhtizin, S.M. Sultanmagomedov, T.S. Sultanmagomedov, D.A. Gulin, A.R. Urmanova // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. – 2020. – V. 10 – № 3. – Р. 243–251.
- Sultanmagomedov T. S. Influence of longitudinal displacements of the pipeline on the stress-strain state during thawing of a section of permafrost soil // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. – 2020. – V. 12 – № 4. – Р. 331–339.

Поступила 15.06.2022 г.

## Информация об авторах

**Файзуллина Э.В.**, магистрант, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Паршикова М.А.**, магистрант, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Гулин Д.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Султанмагомедов Т.С.**, аспирант, ассистент кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Султанмагомедов С.М.**, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, академик РАЕН, декан Факультета трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Насибуллин Т.Р.**, старший преподаватель кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 624.139.22

## STRESS-STRAIN STATE OF A PIPELINE BURIED IN AREAS OF DISTRIBUTION OF HEAVY SOILS

**Elvira V. Fayzullina<sup>1</sup>,**  
elwira.fajzullina@yandex.ru

**Mariya A. Parshikova<sup>1</sup>,**  
maryparshikowa@gmail.com

**Denis A. Gulin<sup>1</sup>,**  
denis.ufa@list.ru

**Timur S. Sultanmagomedov<sup>1</sup>,**  
tsultanmaga@gmail.com

**Sultanmagomed M. Sultanmagomedov<sup>1</sup>,**  
fft2010@mail.ru

**Timur R. Nasibullin<sup>1</sup>,**  
necsapphire@mail.ru

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

**The relevance.** The article deals with the problem of construction and operation of pipelines in the areas of distribution of heaving soils. The problem under consideration is relevant, since one of the main reasons complicating the process of laying pipeline systems in the northern regions is frost heaving, which consists in a multiple increase in the volume of wet soils during freezing. The metal of the pipes of underground trunk pipelines during their operation in the areas of the distribution of heaving soils is subjected to significant deformations due to uncontrolled movements of the soil because of frost heaving. This force interaction of the underground pipeline and frozen ground can cause emergency situations.

**The main aim** of the research is to create a 3D model of the interaction of the pipeline with frozen heaving soil in order to simulate soil heaving and to reveal graphs of the dependence of soil movement on stresses and strains that occur in the pipeline

**Objects:** section of the pipeline buried in the areas of distribution of heaving soils

**Methods.** The literature and regulatory documents on the construction and operation of structures in permafrost soils were studied and the influence of heaving soils on buildings and structures was analyzed, as well as modeling in the Ansys software package was carried out. The paper analyzes the interaction of permafrost soils with an underground pipeline in the AnsysWorkbench software package.

**Results.** The authors have modeled the process of soil heaving and evaluated the stress-strain state of the pipeline buried in the areas of the distribution of heaving soils in the AnsysWorkbench software package using digital twin technology. With the help of the developed model, the values of stresses and total deformations of the pipe wall in contact with frozen soil are obtained and analyzed, and a graphical dependence of the observed values is constructed with an increase in the heaving process and an increase in the heaving area.

### Key words:

Pipeline, stress-strain state, heaving, construction, simulation.

### REFERENCES

1. Borodavkin P.P. *Mekhanika gruntov v truboprovodnom stroitelstve* [Soil mechanics in pipeline construction]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ., 1986. 224 p.
2. Petrov A.M., Sychkina E.N. Analysis of the features of the calculation of underground pipelines on heaving soils. *Master's journal*, 2020, no. 1, pp. 120–127. In Rus.
3. Cytovich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 448 p.
4. Vzaimodeystvie system truboprovodnogo transporta i prirodnoy sredy [Interaction of pipeline transport systems and the natural environment]. *Dobycha nefti i gaza* [Oil and gas extraction]. Available at: <http://oiltool.ru/component/content/article/85-promyshlennaya-bezopasnost-okhrana-truda-ekologiya-strakhovanie-opasnykh-obektov/354-vzaimovliyanie-sistem-truboprovodnogo-transporta-i-prirodnoj-sredy> (accessed 23 February 2022).
5. SP 22.13330.2016. *Svod pravil. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83\* (s Izmeneniyami № 1, 2, 3)* [Set of rules 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83\* With Amendments No. 1, 2, 3]. Moscow, StandardInform Publ., 2019. 228 p.
6. Nishimura S., Gens A., Olivella S., Jardine R.J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Geotechnique*, 2009, no. 3, pp. 159–171.
7. Laliberte G.E., Brooks R.H., Corey A.T. Properties of unsaturated porous media. *Journal of Irrigation Draining Division*, 1968, no. 94, pp. 57–75.
8. Osowell J.M. Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons 1. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, vol. 48, no. 9, pp. 1412–1431.
9. Bouyoucos G.J. Movement of soil moisture from small capillaries to the large capillaries of the soil upon freezing. *J. Agriculture Research*, 1923, vol. 24, pp. 427–431.
10. Li H., Lai Y., Wang L., Yang X., Jiang N., Li L., Wang C., Yang B. Review of the state of the art: interactions between a buried pipeline and frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, vol. 157, pp. 171–186.
11. Nikolaeva M.I., Atlasova R.A., Berdyev S.S., Ivanov A.G. Model of the interaction of the «underground pipeline – frozen soil» system. *The arctic XXI century. Technical sciences*, 2015, no. 1, pp. 44–50. In Rus.
12. Gulin D.A., Fayzullina E.V., Sharipova E.I., Glazkov A.S., Dusalimov M.E. The problem of heaving in pipeline construction and methods of its elimination. *Problems of Gathering, Treatment and*

- Transportation of Oil and Oil Products*, 2020, no. 4, pp. 60–73. In Rus.
13. Markov E.V. *Obespechenie proektnogo polozheniya magistral'nykh truboprovodov v usloviyakh puchinistykh gruntov*. Avtoref-erat Dis. Kand. nauk [Ensuring the design position of trunk pipelines in conditions of heaving soils. Cand. Diss. Abstract]. Tyumen, 2020. 24 p.
  14. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Kukushkin K.V., Maruseva V.M., Kulemin V.Yu. Digital twins and digital transformation of enterprises of the defense industry. *Bulletin of the East Siberian Open Academy*, 2019, no. 32, pp. 1–39. In Rus.
  15. Tumanova E.Yu., Gabdurasitova E.E., Parshikova M.A., Tolstel D.O., Chizhov A.E. Analiz vliyanija otklonenij formy emkostnogo oborudovaniya na velichinu vozniyayushchikh maksimalnykh napryazhenij [Analysis of the influence of shape deviations of capacitive equipment on the value of the resulting maximum stresses]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya. Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki, dostizheniya i innovatsii* [Fundamental and applied scientific research: current issues of modern science, achievements and innovations]. Ufa, Bulletin of Science Publ., 2020, pp. 96–102.
  16. Parshikova M.A., Fayzullina E.V., Gulin D.A. Issledovanie napryazhymo-deformirovannogo sostoyaniya truboprovoda, prolozhennogo na uchastkakh rasprostraneniya puchinistykh gruntov [Investigation of the stress-strain state of the pipeline laid in the areas of the distribution of heaving soils]. *XIV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh. Aktual'nye problemy nauki i tekhniki* [XIV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists Actual problems of science and technology]. Ufa, Ufa State Petroleum Technological University Publ., 2021. Vol. 1, pp. 177–179.
  17. Mouloud D., Bouthicha D. Simulation Numérique par ANSYS-Workbench. *Fluid Structure Interaction*, 2017, vol. 4, pp. 65–89.
  18. Parshikova M.A., Fayzullina E.V., Gulin D.A. Razrabotka tsifrovogo dvoynika uchastka truboprovoda, prolozhennogo na uchastke rasprostraneniya puchinistykh gruntov [Development of a digital twin of a pipeline section laid on a section of the distribution of heaving soils]. *Neftegazovy terminal* [Oil and gas terminal]. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2021. pp. 135–139.
  19. Cheng Z., Damjanac B. Extension of Mohr–Coulomb model considering opening and closure of tension cracks. *55th U.S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium*. ARMA, Houston, Texas, 2021. pp. 1157.
  20. Cui X.Z., Jin O., Shang Q.S., Liu S.T. Mohr–Coulomb model considering variation of elastic modulus and its application. *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 306–308, pp. 1445–1448.
  21. Kudasheva M.I., Kaloshina S.V. Comparison of the Mohr–Coulomb model and the hardening soil model in the Plaxis software package. *Modern technologies in construction. Theory and practice*, 2017, vol. 2, pp. 87–95. In Rus.
  22. GOST 28622-2012. *Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya stepeni puchinistosti* [Interstate standard 28622-2012. Soils. Method of laboratory determination of the degree of heaviness]. Moscow, StandardInform Publ., 2013. 11 p.
  23. Bakhtizin R.N., Sultanmagomedov S.M., Sultanmagomedov T.S., Gulin D.A., Urmanova A.R. Experimental study of the axial movement of the pipeline in permafrost conditions with changes in soil temperature and humidity. *Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 243–251.
  24. Sultanmagomedov T.S. Influence of longitudinal displacements of the pipeline on the stress-strain state during thawing of a section of permafrost soil. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 331–339.

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

- Elvira V. Fayzullina**, master student, Ufa State Petroleum Technological University.
- Mariya A. Parshikova**, master student, Ufa State Petroleum Technological University.
- Denis A. Gulin**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.
- Timur S. Sultanmagomedov**, postgraduate student, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.
- Sultanmagomed M. Sultanmagomedov**, Dr. Sc., Academician of the Russian Academy of Sciences, professor, Dean of the Faculty of Pipeline Transport, Ufa State Petroleum Technological University.
- Timur R. Nasibullin**, senior lecturer, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 622.271.333

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КАРЬЕРОВ, СЛОЖЕННЫХ ОСАДОЧНЫМИ ПОРОДАМИ

Ефремов Евгений Юрьевич<sup>1</sup>,  
Efremov-eu@mail.ru

Обогрелова Полина Игоревна<sup>2</sup>,  
p.obogrelova@icloud.com

<sup>1</sup> Институт горного дела УрО РАН,  
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

<sup>2</sup> Уральский государственный горный университет,  
Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

**Актуальность.** Анализ устойчивости горных пород при решении геомеханических и инженерно-геологических задач сталкивается с рядом трудностей при отображении физико-механических свойств массива горных пород на расчетных моделях. Среди них основными являются: широкий диапазон свойств, структура массива, отсутствие достаточного количества исходных данных. Исходные параметры имеют существенную важность при математическом моделировании, что выражается в принципе GIGO (англ. Garbage In, Garbage Out, «Мусор на входе – мусор на выходе»).

**Целью** работы является изучение влияния разброса физико-механических свойств горных пород, слагающих борта карьеров, на их устойчивость. Объектом исследования является верхняя часть массива, сложенная комплексом пород мезо-кайнозойского возраста. Полигоном исследования выступает Соколовское железорудное скарновое месторождение, разрабатываемое одноименным карьером в сложных инженерно-геологических условиях.

**Методы.** Исследование проводилось в рамках гипотезы предельного равновесия с помощью расчетных методов Филлениуса, Спенсера, Бишопа. Изучалась чувствительность модели борта карьера к прочностным параметрам горных пород: скеллению и углу внутреннего трения. Анализ чувствительности осуществлялся с помощью перебора значений параметров в пределах диапазона свойств, полученных в ходе испытаний.

**Результаты и выводы.** Результаты исследований позволили установить зависимости коэффициента устойчивости бортов карьера от изменчивости физико-механических свойств мезо-кайнозойских отложений. Для инженерно-геологических условий Соколовского карьера выявлены породы, представляющие наибольшие риски с точки зрения устойчивости бортов. Применяемый подход является разновидностью сценарного прогнозирования и наряду с решением обратных задач, необходимых для калибровки моделей, является подходящим методом для оценки геомеханических условий.

### Ключевые слова:

Анализ устойчивости бортов, борт карьера, гипотеза предельного равновесия, инженерно-геологические условия, осадочные породы, горный массив, коэффициент устойчивости бортов карьера.

### Введение

В современной практике анализа устойчивости бортов карьеров наибольшее распространение получили различные варианты математического моделирования – численные и аналитические подходы. Примерами первых являются конечно-элементные и конечно-дискретные модели, примерами вторых – модели в рамках гипотезы предельного равновесия. Модели функционально связывают входные параметры (исходные данные, определяемые во время предварительных испытаний, или предполагаемые) с величинами, отражающими устойчивость массива. Соответственно, при математическом моделировании большую важность имеет качество исходных данных, что выражается в известном принципе GIGO (англ. Garbage In, Garbage Out, «Мусор на входе – мусор на выходе»).

При этом решение задач геомеханики, связанных с анализом устойчивости массива пород, при проектировании как подземных, так и открытых горных выработок, сопровождается рядом трудностей:

Во-первых, естественные массивы горных пород обладают широкой изменчивостью физико-механических параметров даже в пределах одного инженерно-

геологического элемента (ИГЭ) [1]. Во-вторых, прочностные свойства протяженных участков массива размерами, сравнимыми с размерами бортов карьера и очистных подземных выработок, определяются структурой массива, а не свойствами отдельных пород. На устойчивость массива влияют: трещиноватость, наличие тектонических нарушений, разломов, а также ширина раскрытия трещин и состав заполнителя, обводненность и т. д. В-третьих, отбор и проведение множественных испытаний образцов, необходимые для исчерпывающего описания пространственного распределения прочностных параметров пород, требуют значительных затрат. Различные подходы к определению устойчивости массивов для практики геомеханики с учетом приведенных трудностей предлагали L. Muller, E Hoek, M.B. Рац, J.C. Jaeger, Z.T. Beniawski K. B. Рупеннейт [1–5] и др.

В данной статье предложен один из возможных подходов решения практических задач устойчивости бортов карьера – изучение влияния диапазона физико-механических свойств отдельных составляющих массива (инженерно-геологических элементов) на устойчивость борта карьера. Исследование проводилось в рамках модели предельного равновесия.

### Инженерно-геологические условия

В качестве полигона исследования использовалось Соколовское железорудное скарновое месторождение, отрабатываемое одноименным карьером. Месторождение входит в Тургайскую железорудную провинцию, одну из крупнейших в Евразии, наряду с Сарбайским, Ломоносовским и Качарским месторождениями, и разрабатывается ССГПО. Фактические размеры карьера составляют около 3000 м в длину и 2000 м в ширину, глубина карьера – 550 м. Добыча осуществляется с 1964 г., на данный момент карьер находится в стадии доработки прибортовых запасов. Буровые работы производятся с помощью станков СБШ 190/250, приведение борта в предельное состояние – с помощью станков СБУ 125. Погрузка породы осуществляется экскаваторами с прямой лопатой с объемом ковша от 5 до 12 м<sup>3</sup>. Транспортировка руды и пород осуществляется комбинированным способом в два этапа: на глубоких горизонтах, от забоя до станций перегрузки, с применением автосамосвалов, от станций перегрузки до отвалов и рудных складов с применением железнодорожного транспорта.

Инженерно-геологические условия отработки карьера считаются сложными. Сложность условий определяется комплексом факторов: физико-механическими свойствами пород (характеристики приведены в таблице), геологическим строением (схема строения приведена на рис. 1), склонностью пород к выветриванию и присутствием подземных вод.

Геологический разрез месторождения сложен осадочно-вулканогенными породами нижнего карбона (палеозойской эры) и перекрывающим их горизонтально залегающим комплексом осадочных пород мезо-кайнозойского возраста. Таким образом, на месторождении выделяются два отличающихся инженерно-геологических комплекса.

Первый комплекс сложен палеозойскими породами: от крепких устойчивых до среднеустойчивых (на рис. 1 обозначены цифрами 1–3), второй комплекс, представленный покровными мезо-кайнозойскими породами и глинистыми породами коры выветривания палеозойских пород общей мощностью 80–150 м и расположенный выше первого, состоит из слабых и средней крепости пород (на рис. 1 комплексу соответствуют породы, обозначенные цифрами 4–11).

Комплекс крепких и средней крепости палеозойских пород представлен эфузивными, метаморфическими и осадочно-вулканогенными породами: порфиритами, скарнами, туфами, туффитами, известняками и рудами. Породы палеозойского комплекса до глубины 50–100 м и в тектонических зонах характеризуются выветрелостью, сильной трещиноватостью и раздробленностью (на рис. 1 обозначены 2 и 3). В породах этого участка выделяются трещины, совпадающие со слоистостью вулканогенно-осадочной толщи, субширотные крутопадающие трещины, трещины отдельности меридионального простирания.

Второй комплекс, осадочная толща мезо-кайнозойских пород, залегает горизонтально на глинах коры выветривания мощностью 10–30 м, местами

напрямую на палеозойских породах. В разрезе осадочного комплекса основными являются слабые песчано-глинистые разности с преобладанием меловых песков мощностью 50–80 м. Выше меловых песков находятся породы средней крепости: кремнистые и глинистые опоки. В кровле опок залегают пластичные чеганские глины мощностью 20–30 м, являющиеся региональным водоупором, выше них расположены пески олигоценового возраста, четвертичные супеси и суглинки.

Осадочные отложения характеризуются высокой обводненностью и вмещают несколько водоносных горизонтов. Грунтовые воды, приуроченные к четвертичным отложениям суглинков, образуют первый водоносный горизонт. Наибольшее значение имеет второй водоносный горизонт, заключенный в песках верхнего мела. Этот горизонт занимает большую площадь и имеет значительную мощность, водоприток из этого горизонта составляет 70 % от общего водопритока в карьер. Третий водоносный горизонт развит в трещиноватых палеозойских породах, гидравлически связан с меловым горизонтом.

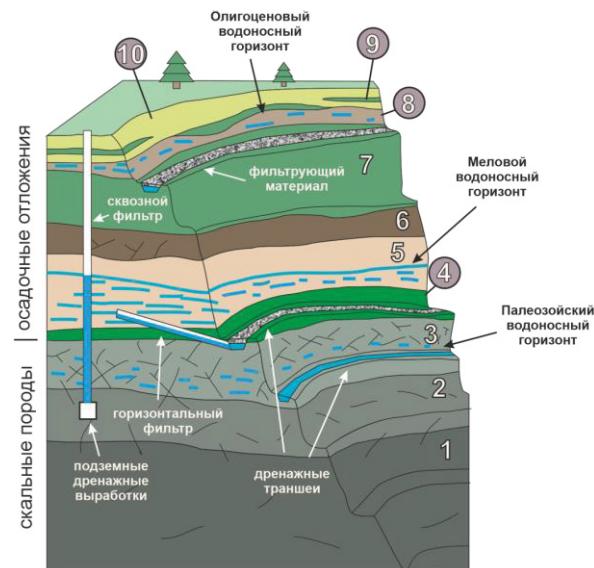


Рис. 1. Схема инженерно-геологических условий Соколовского месторождения: 1 – монолитные скальные палеозойские породы; 2 – нарушенные скальные палеозойские породы; 3 – сильно нарушенные скальные палеозойские породы; 4 – кора выветривания палеозойских пород; 5 – пески меловые; 6 – опоки эоценовые; 7 – глины чеганские; 8 – пески олигоценовые; 9 – четвертичные суглинки; 10 – четвертичные супеси

Fig. 1. Scheme of engineering and geological conditions of the Sokolovskoe ore deposit: 1 – monolithic paleozoic rocks; 2 – fractured paleozoic rocks; 3 – badly fractured rocky paleozoic rocks; 4 – weathering crust of paleozoic rocks; 5 – chalk sands; 6 – eocene flasks; 7 – chegansky clays; 8 – oligocene sands; 9 – quaternary loams; 10 – quaternary sandy loams

Как показывает практика разработки Соколовского, Сарбайского и Качарского месторождений (расположенных относительно недалеко, в схожих геологи-

ческих условиях, разрабатываемых крупными карьерами), описанные выше геологические условия определяют риски опасных инженерно-геологических процессов. По каждому месторождению фиксируются сотни нарушений устойчивости бортов, связанных с вывалами и оползнями. Размер нарушений составляет от единиц до сотен метров вдоль борта и от единиц до десятков метров в высоту.

Так, с точки зрения устойчивости бортов наибольшую опасность представляет комплекс осадочных пород. Негативным сочетанием факторов являются пластичность чеганских глин, трещиноватость палеогеновых опок и обводненность меловых песков.

Толща песков верхнемелового водоносного горизонта водонасыщена, пески проявляют свойства плытунов, что делает необходимым опережающее осушение. Сланцеватые, опоковидные глины (чеганской свиты низкой влажности 19–46 % и большой пластичности 25–64 %), песчаники и опоки эоцена делают слагаемые ими откосы при выветривании склонными к обрушениям и осыпям. Олигоценовые пески в обводненном состоянии образуют оплывины. Неогеновые пестроцветные глины при смачивании склонны к набуханию и оползанию, что нарушает устойчивость вышележащих пород. Четвертичные суглинки и супеси в сухом состоянии устойчивы и способны держать угол откоса в предельном положении, но подземные воды четвертичного и средне олигоценового водоносных горизонтов негативно влияют на их устойчивость.

Водопонижение карьера осуществляется посредством дренажной галереи, окружающей карьер, пройденной в верхней выветрелой зоне палеозойских пород и дренирующей меловой горизонт с помощью скважин и сквозных фильтров (рис. 1). Открытый дренаж карьера представляет собой траншеи, дренирующие олигоценовый и меловой водоносные горизонты, и горизонтальные фильтры, дренирующие меловой горизонт.

В рамках данной работы анализировалась устойчивость верхней части карьера, сложенной осадочными отложениями. Устойчивость бортов в случае Соколовского месторождения определяется в т. ч. режимом подземных вод, т. к. физико-механические свойства пород, слагающих борта в обводненном состоянии, значительно изменяются.

Расчет проводился для типового участка верхней части борта карьера, сложенного мезо-кайнозойскими отложениями. Высота уступа на участке составляет 10 м, ширина берм безопасности – 10 м, ширина транспортных берм – 25 м. Перепад отметок исследуемого участка составил 132 м (12 уступов), результирующий угол борта карьера на участке составляет 26°.

Упрощенно геологический разрез мезо-кайнозойских отложений (сверху вниз) можно представить в следующем виде:

- четвертичные отложения, глины, суглинки, супеси (сред. мощность ~7 м);
- пески олигоценовые (~2–6 м);
- глины чеганской свиты (~10–30 м);

- опоки Эоценовые (~20–45 м);
- пески Меловые (~15–35 м);
- коры выветривания Палеозойских пород (~2–15 м).

### Методика исследования

Цель исследования – оценить влияние разброса прочностных характеристик горных пород на устойчивость массива горных пород, слагающих борта Соколовского карьера. Рассматривается наиболее опасный участок, расположенный в верхней части разреза, сложенный мезо-кайнозойскими отложениями.

Методика исследования базируется на анализе составляющих физико-механических параметров в соответствии с моделью предельного равновесия.

Теория предельного равновесия широко применяется в геотехнических и геомеханических расчетах на объектах гражданского строительства и горных разработках при оценке устойчивости откосов авто- и ж/д дорог, отвалов, бортов карьеров и др. [6–9]. В рамках теории потеря устойчивости склона происходит, когда сумма сил внешних воздействий, действующих на участок склона, превышает реактивные силы сопротивления сдвигу [10]. Смещение массива при этом происходит вдоль поверхности скольжения. Определяющими прочностными параметрами массива выступают: удельный вес, сцепление и угол внутреннего трения.

Характеристикой устойчивости в рамках теории является коэффициент устойчивости. Если он принимает значение единицы, уравнение равновесия не выполняется, что определяется как потеря устойчивости.

На основе теории существует несколько математических моделей устойчивости склонов, различающихся тем, какие уравнения статики применяются, учитываются ли (и как учитываются) силы взаимодействия между отсеками, на которые разбивается склон, как учитывается сила реакции основания в отсеке и т. д. Наиболее распространенными являются модели Феллениуса, Бишопа, Моргенштерн-Прайса, Спенсера, Касательных сил и др. Ключевыми физико-механическими параметрами в рамках модели являются: удельный вес пород, сцепление, угол внутреннего трения. Примеры решения задач, связанных с устойчивостью карьера, описаны в работах [11–18].

Методика исследований состоит из двух этапов:

На первом этапе произведен расчет устойчивости типового участка верхней части борта карьера, сложенной осадочными породами. В качестве исходных расчетных параметров использовались средневзвешенные характеристики грунтов и средняя мощность отложений (таблица).

На втором этапе для каждого ИГЭ производилась серия расчетов с перебором параметров, соответствующим разбросу физико-механических свойств данного элемента, с шагом 2° для угла внутреннего трения и 20 кПа для сцепления. Остальные параметры соответствовали исходному расчету. Прочностные параметры пород приведены в таблице.

Расчет устойчивости проводился с применением методов Филлениуса, Спенсера, Бишопа для кругло-цилиндрических поверхностей скольжения. Реализа-

ция расчетной модели осуществлялась в программном комплексе Geostab. Устойчивость массивов грунта оценивается сопоставлением действительного расчетного напряженного состояния с предельно возможным. За основу берется понятие о *коэффициенте запаса устойчивости* [19–21].

**Таблица.** Физико-механические характеристики  
**Table.** Physical and mechanical characteristics

ИГЭ (Инженерно-геологический элемент) EGE (Engineering-geologic element)	Наименование пород Rocks	Мощность слоя, м Layer thickness, m	физико-механические характеристики пород physical and mechanical properties of rocks				
			в образце/piece		в массиве/rock mass		
			ср. плотность $\gamma$ , т/м <sup>3</sup> density, t/m <sup>3</sup>	Сцепление $C_{CP}$ , кПа Shear strength, kPa	Угол внутр. трения Friction stress $\varphi^\circ$	$C$ , кПа $C$ , kPa	$\varphi^\circ$
ИГЭ 1/EGE 1	Суглинки четвертичные Quaternary loams	7	2	50	15	20–80	10–20
ИГЭ 2/EGE 2	Глины чеганские Chegansky clays	10	1,88	64	12	20–90	7–17
ИГЭ 3/EGE 3	Опоки палеогеновые Paleogen gaize	42	1,75	127	24	80–160	20–30
ИГЭ 4/EGE 4	Пески меловые Cretaceous sands	38	1,94	36	25	0–80	15–35
ИГЭ 5/EGE 5	Кора выветривания Crust of weathering	6	1,88	77	21	40–120	15–25

### Результаты

Результаты анализа устойчивости приведены на рисунках в виде диаграмм, связывающих прочностные характеристики инженерно-геологических элементов с коэффициентом устойчивости борта карьера (рис. 2, 3). Результаты демонстрируют, что для большинства инженерно-геологических элементов при данной конфигурации бортов (выполненные борта, средний угол верхней части борта карьера около  $15^\circ$ ), изменчивость физико-механических показателей не

оказывает значительного влияния на устойчивое состояние бортов. Коэффициент запаса устойчивости даже при наихудших значениях параметров остается превышающим нормативные значения. Одним из факторов низкого влияния ИГЭ 1 (четвертичных суглинков) и ИГЭ 2 (олигоценовых песков) на устойчивость является расположение в верхней части разреза. В связи с этим вес вышележащей части массива оказывается недостаточным, чтобы вывести борт из устойчивого состояния.

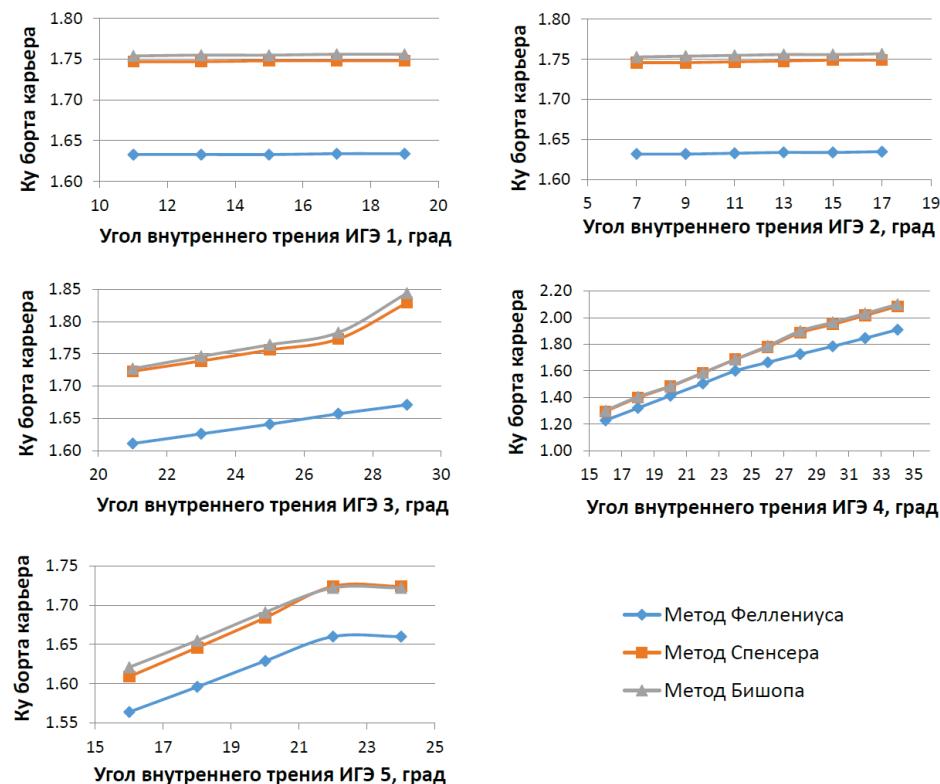


Рис. 2. Зависимости коэффициента устойчивости борта карьера от угла внутреннего трения инженерно-геологических элементов

Fig. 2. Relationship between safety factor of pit slope and angle of friction of rocks

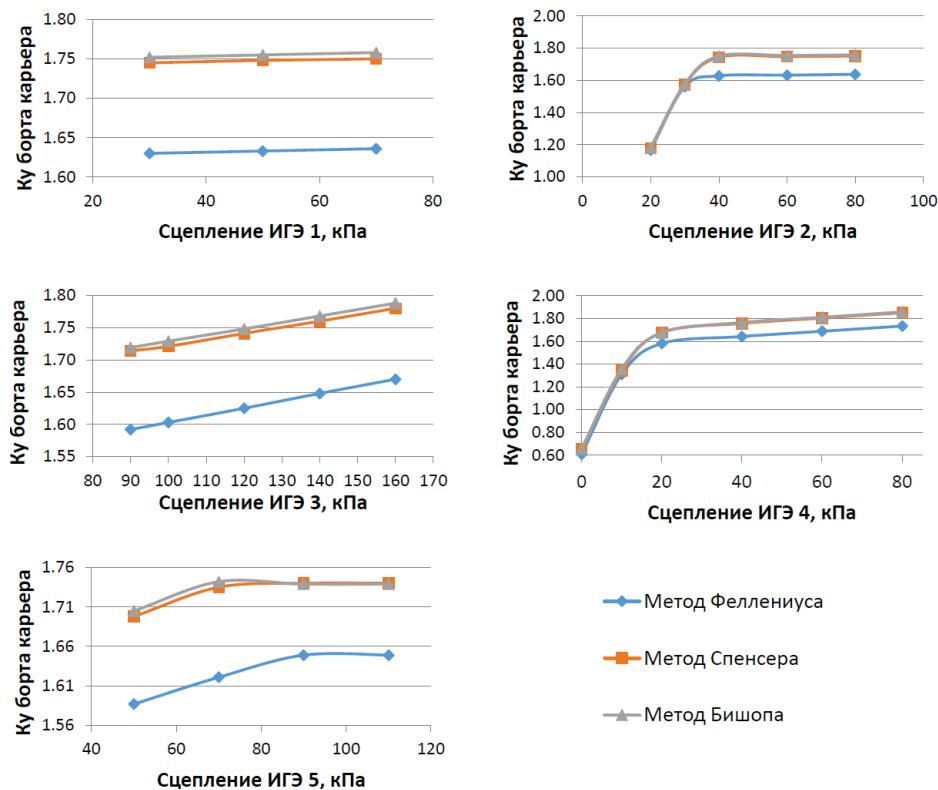


Рис. 3. Зависимости коэффициента устойчивости борта карьера от величины сцепления инженерно-геологических элементов

Fig. 3. Relationship between safety factor of pit slope and cohesion of rocks

Вместе с тем для нижерасположенных пород – меловых песков и коры выветривания – имеется диапазон прочностных показателей, соответствующий увлажненному состоянию, в котором происходит значительное снижение коэффициента устойчивости. Для ИГЭ 2 и ИГЭ 4 значениями, представляющими опасность, являются снижение величины сцепления ниже 15 кПа, а для ИГЭ 4 – угол внутреннего трения меньше 16°. Таким образом, анализ чувствительности модели показывает, что в условиях Соколовского месторождения устойчивость бортов карьеров, сложенных осадочными отложениями, определяется, в первую очередь, изменчивостью свойств меловых песков, при этом меловой водоносный горизонт является основным водоносным горизонтом. В связи с этим практическим выводом исследования является важность поддержания работы дренажной системы на протяжении всего цикла работы карьера.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мюллер Л. Механика скальных массивов. – М.: Мир, 1971. – 257 с.
2. Рац М. В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. – М.: Наука, 1968. – 108 с.
3. Jaeger J.C. Fundamentals of rock mechanics. – USA: Wiley-Blackwell, 2007. – 488 p.
4. Beniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. – Canada: Wiley-Interscience, 1989. – 250 p.
5. Руппенейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1975. – 223 с.
6. Ким М.С., Ким В.Х. Основы механики грунтов. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. – 143 с.
7. Bell J.M. General slope stability analysis // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. – 1968 – V. 94. – № 6. – P. 1413–1431.
8. Comparison of finite-element limit analysis and strength reduction techniques / F. Tschuchnigg, H.F. Schweiger, S.W. Sloan, A.V. Lyamin, I. Raissakis // Géotechnique. – 2015. – V. 65. – № 4. – P. 249–257.
9. Cheng Y.M., Lansivaara T., Wei W.B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods // Computers and Geotechnics. – 2007. – V. 3. – № 3. – P. 137–150.
10. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Наука, 1965. – 280 с.
11. Slope stability analysis using elastic finite element stress fields / L. Shiying, S. Zhenning, L. Ming, S. Longtan // Engineering

#### Заключение

Результаты исследования позволили установить породы, изменчивость физико-механических свойств которых оказывает влияние на устойчивость бортов карьера в инженерно-геологических условиях осадочных толщи.

Данный подход, использующий вариационные расчеты, может применяться как на аналитических, так и на численных моделях. Применяемый подход является разновидностью сценарного прогнозирования и, наряду с решением обратных задач, необходимых для калибровки моделей, является подходящим методом для оценки геомеханических условий.

Исследование выполнено в рамках Госзадания ИГД УрО РАН, тема 075-00412-22 ПР, тема 2 (2022–2024) (FUWE-2022-0002) рег. № 1021062010532-7-1.5.1.

- Geology. – 2020. – V. 273. – P. 105673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105673>
12. Liu X., Wang Y., Li D. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods // Computers and Geotechnics. – 2019. – V. 111. – P. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104203>
13. Исследование устойчивости уступов верхних горизонтов стационарного борта разреза «Богатырь» / О.В. Старостина, В.Н. Долгоносов, С.Б. Алиев, Е.В. Абуева // Уголь. – 2019. – Т. 1138. – № 1. – С. 27–32.
14. Бабец Д.В. Развитие классификации горных пород по степени устойчивости с учетом их естественной нарушенности // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2016. – Т. 97. – № 2. – С. 44–51.
15. Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при увеличении глубины отработки / Б.С. Мухаметкалиев, Е.С. Калюжный, С.А. Съедина, Н.К. Абдикеров // Горный журнал. – 2018. – № 4. – С. 27–31.
16. Carrubba P., Moraci N. Residual strength parameters from a slope instability // Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. – St. Louis, Missouri, 1993. – Paper no. 2.58.
17. Tschuchnigg F., Schweiger H.F., Sloan S.W. Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part II: Back analyses of a case history // Computers and Geotechnics. – 2015. – V. 70. – P. 178–189.
18. Lam L., Fredlund D.G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis // Canadian Geotechnical Journal. – 1993. – V. 30. – № 6. – P. 904–919.
19. Руководство пользователя GeoStab 7.0.10 Расчет устойчивости склонов и откосов. – 2020. – 139 с. URL: <https://malinisoft.ru/GeoStab-UserGuide> (дата обращения 10.06.2022).
20. Nasvi M.C.M., Krishnya S. Stability Analysis of Colombo-Katunayake Expressway (CKE) using finite element and limit equilibrium methods // Indian Geotechnical Journal. – 2019. – V. 49. – P. 620–634.
21. Singh S.K., Negi M.S. Singh J. Strengthening of slope by soil nailing using finite difference and limit equilibrium methods // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. – 2021. – V. 7. – P. 64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00308-4>

Поступила 15.06.2022 г.

#### Информация об авторах

**Ефремов Е.Ю.**, научный сотрудник Института горного дела УрО РАН.  
**Обогрелова П.И.**, студент Уральского государственного горного университета.

UDC 622.271.333

## SLOPE STABILITY ANALYSIS FOR OPEN PIT SIDES COMPOSED OF SEDIMENTARY ROCKS

Evgeniy Yu. Efremov<sup>1</sup>,

Efremov-eu@mail.ru

Polina I. Obogrelova<sup>2</sup>,

p.obogrelova@icloud.com

<sup>1</sup> Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
58, Mamin-Sibiryak street, Yekaterinburg, 620219, Russia.

<sup>2</sup> Ural State Mining University,  
30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russia.

**Relevance.** Rock mass stability analysis faces a number of difficulties when modelling the mechanical conditions of rocks, these are a wide range of strength properties, the structure of the rock mass, and the lack of a sufficient amount of input data. The input parameters are of significant importance for mathematical modelling, which is expressed in the GIGO principle (Garbage In, Garbage Out).

**The purpose** of the research is to determine the influence of the strength properties scatter of sedimentary rocks in the open pit side. The object of research is the upper part of the open pit side, composed of the complex of the Mesozoic and Cenozoic rocks. The research site is the Sokolovskoe ore deposit, developed by the mine of the same name.

**Research methods.** The study was carried out using the of limit equilibrium method. The models of Fellenius, Spencer, Bishop were used. The sensibility of the pit slope model to the strength parameters (cohesion and angle of internal friction) of soils was studied. Sensibility analysis was carried out by exhaustive search method in a range of properties obtained using the failure tests.

**Conclusions.** The relationship of the safety factor and variability of the strength properties are obtained. For the conditions of the Sokolovskoe deposit, rocks have been identified that pose the greatest danger to the stability of the open pit sides. The applied approach is a kind of scenario analysis, and along with inverse problems, is a suitable method for evaluation of the geological factors.

### Key words:

Slope stability analysis, open pit side, limit equilibrium method, geological factors, soils, rock mass, safety factor of open pit slope.

The research was carried out within the State assignment of IM UB RAS, subject 075-00412-22 IIP, subject 2 (2022 –2024) (FUWE-2022-0002) pez. No.1021062010532-7-1.5.1.

### REFERENCES

1. Muller L. *Mekhanika skalnykh massivov* [Rock mass mechanics]. Moscow, Myr Publ., 1971. 257 p.
2. Rats M.V. *Neodnorodnost gornykh porod i ikh fizicheskikh svoystv* [Inhomogeneity of rocks and their physical properties]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 108 p.
3. Jaeger J.C. *Fundamentals of rock mechanics*. USA, Wiley-Blackwell, 2007. 488 p.
4. Beniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. Canada, Wiley-Interscience, 1989. 250 p.
5. Ruppeneit K.V. *Deformiruemost massivov treshinovatykh gornykh porod* [Deformability of fractured rock mass]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 223 p.
6. Kim S., Kim V.Kh. *Osnovy mekhaniki gruntov* [Fundamentals of soil mechanics]. Voronezh, Voronezhskiy gosudarstveniy technicheskiy universitet, 2017. 143 p.
7. Bell J.M. General slope stability analysis. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, vol. 94, no. 6, pp. 1413–1431.
8. Tschuchnigg F., Schweiger H.F., Sloan S.W., Lyamin A.V., Raissakis I. Comparison of finite-element limit analysis and strength reduction techniques. *Géotechnique*, 2015, vol. 65, no. 4, pp. 249–257.
9. Cheng Y.M., Lansivaara T., Wei W.B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and Geotechnics*, 2007, vol. 3, no. 3, pp. 137–150.
10. Fisenko L. *Ustoychivost bortov karyerov i otvalov* [The stability of the sides of boats and dumps]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 280 p.
11. Shiyi L., Zheming S., Ming L., Longtan S. Slope stability analysis using elastic finite element stress fields. *Engineering Geology*, 2020, vol. 273, p. 105673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105673>
12. Liu X., Wang Y., Li D. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods. *Computers and Geotechnics*, 2019, vol. 111, pp. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cust.2021.104203>
13. Starostina O.V., Dolgonosov V.N., Aliev S.B., Abueva E.V. Issledovanie ustoychivosti ustupov verhnikh gorizontov statcionarnogo borta razreza «Bogatyr» [Investigation of the stability of the ledges of the upper horizons of the stationary side of the Bogatyr section]. *Coal scientific journal*, 2019, vol. 1138, no. 1, pp. 27–32.
14. Babets D.V. Razvitiye klassifikatsii gornykh porod po stepeni ustoychivosti s uchetom ikh estestvennoy narushennosti [Development of classification of rocks on degree of stability taking into account their natural disturbance]. *Bulletin of Mikhail Ostrogradsky KrNU*, 2016, vol. 97, no. 2, pp. 44–51.
15. Mukhametkaliev B.S., Kalyuzhny E.S., Syedina S.A., Abdibekov N.K. Geomechanicheskoe obespechenie ustoychivosti bortov karyera pri uvelichenii glubini obrabotki [Geomechanical ensuring stability of the pit walls with increasing mining depth]. *Mining Journal*, 2018, no. 4, pp. 27–31.
16. Carrubba P., Moraci N. Residual Strength Parameters from a Slope Instability. *Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. St. Louis, 1993, paper no. 2.58.
17. Tschuchnigg F., Schweiger H.F., Sloan S.W. Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part II: Back analyses of a case history. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 70, pp. 178–189.
18. Lam L., Fredlund D.G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, vol. 30, no. 6, pp. 904–919.
19. *Rukovodstvo polzovatelya GeoStab* [GeoStab User Guide 7.0.10 Calculation of the stability of slopes and slopes]. 2020. 139 p. Available at: <https://malininsoft.ru/GeoStab-UserGuide> (accessed 10 June 2020).
20. Nasvi M.C.M., Krishnya S. Stability analysis of Colombo–Katunayake Expressway (CKE) using finite element and limit equilibrium methods. *Indian Geotechnical Journal*, 2019, vol. 49, pp. 620–634.
21. Singh S.K., Negi M.S. Singh J. Strengthening of slope by soil nailing using finite difference and limit equilibrium methods. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2021, vol. 7, pp. 64.

Received: 15 June 2022.

### Information about the authors

Evgeniy Yu. Efremov, researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Polina I. Obogrelova, student, Ural State Mining University.

УДК 630\*5:630\*91:004:528.946:349.415

## ОЦЕНКА ЗАПАСА ДРЕВОСТОЕВ НА ЗЕМЛЯХ ЛЕСНОГО ФОНДА С УЧЕТОМ АНТРОПОГЕННЫХ РИСКОВ: ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Лепихина Ольга Юрьевна<sup>1</sup>,  
Lepikhina\_OYu@pers.spmi.ru

Демидова Полина Михайловна<sup>1</sup>,  
Demidova\_PM@pers.spmi.ru

Колесник Ольга Александровна<sup>1</sup>,  
Kolesnik\_OA@pers.spmi.ru

Ковязин Василий Федорович<sup>1</sup>,  
vfkedr@mail.ru

Гурьева Ольга Сергеевна<sup>1</sup>,  
olga.gureva1995@gmail.com

Басова Лидия Алексеевна<sup>1</sup>,  
s205051@stud.spmi.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

**Актуальность.** Задача обеспечения автоматизированного учета, оценки и прогноза запаса лесных ресурсов является одной из важнейших направлений государственной стратегии развития лесного комплекса. Создание автоматизированной информационной системы по геодезическим данным, способной реализовывать качественный и полноценный информационный процесс по сбору, обработке, анализу, моделированию, прогнозу и визуализации пространственно-временных данных о состоянии лесных ресурсов с учетом основных рисков лесного хозяйства, является одним из важных механизмов повышения эффективности лесопользования.

**Цель:** создание методического и программного обеспечения оценки запаса древесных ресурсов на землях лесного фонда с учетом антропогенных рисков.

**Объекты:** лесные насаждения Чернореченского участкового лесничества Всеволожского лесничества Ленинградской области.

**Методы.** На основе применения методов регрессионного моделирования получены математические модели зависимости запаса насаждений различных древесных пород от среднего возраста древостоя в лесном выделе; в основу разработанного программного обеспечения заложены авторские методические решения по оценке и прогнозу запаса древесины.

**Результаты.** Применение полученных зависимостей для Чернореченского лесничества Всеволожского района Ленинградской области позволило рассчитать значения запаса древесины по состоянию на 2011 и 2021 гг., а также спрогнозировать его значения на 2031 г. Предложена методика оценки ущерба пожара на землях лесного фонда на основе интегрального показателя риска. Автоматизация расчета данного показателя в созданной программе позволила осуществить дифференциацию земель лесничества по трем классам риска пожаров. Сформирована карта зонирования территории объекта исследования по риску сплошных и самовольных рубок леса. Созданное программно-методическое обеспечение может служить основой для реализации одного из главных направлений стратегии развития лесного комплекса России в части создания единой федерально-информационной системы учета и прогноза текущего прироста запаса древесных ресурсов лесного фонда.

### Ключевые слова:

лесные насаждения, запас древостоев, автоматизация учёта лесных ресурсов, антропогенные риски, методика оценки пожара.

### Введение

В России лесопокрытые территории занимают почти 50 % площади страны и 96 % земель лесного фонда. При оценке (таксации) лесного фонда главным показателем является запас древостоя, который характеризует продуктивность лесных земель. Россия является крупнейшей державой по запасам древесины – в целом по стране запасы составляют около 82 млрд м<sup>3</sup>. Средний годичный прирост древесины составляет около 931 млн м<sup>3</sup>.

Наиболее ощутимый ущерб лесам наносится в результате воздействия лесных пожаров (60 % площади погибших лесов), погодных явлений (25 %), вредителей и болезней леса (15 %), промышленных выбросов,

незаконных рубок древесины. Причём более 70 % лесных пожаров возникают из-за влияния антропогенного фактора [1]. Например, за период с 01.01.2021 по 14.11.2021 гг. на землях лесного фонда в Северо-Западном Федеральном округе России зафиксировано 1430 пожаров, а площадь, пройденная огнём, составила 30935,46 га; всего за данный промежуток времени по Российской Федерации произошло 15094 пожаров общей площадью возгорания 10058314,40 га [1]. Исходя из вышесказанного, особую актуальность приобретают задачи охраны лесов с учётом природных и антропогенных рисков.

Для повышения эффективности лесной отрасли и обеспечения устойчивого управления лесным фондом

Правительством РФ разработана «Стратегия развития лесного комплекса» [2], в рамках которой ставятся следующие основные цели: обеспечение достоверными сведениями о лесном фонде, увеличение доли лесного хозяйства в доле валового внутреннего продукта, своевременное и качественное определение запаса древесины, повышение оперативности тушения лесных пожаров до 92,5 %, создание внутреннего рынка круглых лесоматериалов, доведение площади лесовосстановления до 100 %, а также повышение лесистости земель страны до 49,4 %.

Одной из важных проблем на пути достижения отмеченных целей является отсутствие полноценной и единой для территории страны автоматизированной информационной системы сбора, анализа, обработки и наглядного представления данных о запасах лесных ресурсов, а также прогнозе их развития. Причин такого положения несколько.

Во-первых, малая обеспеченность Правительства качественным геопривязанным цифровым картографическим материалом. Значительная доля карт и планов земель лесничеств до сих пор представлена в традиционном бумажном виде. Отсутствие координатной привязки объектов лесничеств существенно снижает эффективность учета и прогноза состояния лесных ресурсов, а также ведет к невозможности использования большого набора современных методов и средств геопространственного анализа и моделирования таксационных данных. Аналогична ситуация с семантическими данными. Так, к примеру, данные о таксационных показателях древостоев до сих пор можно получить исключительно из традиционных лесных справочников, что также затрудняет учет, анализ и прогноз состояния лесов.

Во-вторых, существует проблема недостаточной достоверности и качества инвентаризации лесонасаждений. В таксационных описаниях и планшетах много ошибок как в геопривязке объектов, так и в их описаниях.

В-третьих, остро стоит проблема неактуальности существующих данных о лесном фонде.

Одним из важных механизмов повышения эффективности лесопользования является создание автоматизированной информационной системы, способной реализовывать качественный и полноценный информационный процесс по сбору, обработке, анализу, моделированию, прогнозу и визуализации пространственно-временных данных о состоянии лесных ресурсов с учетом основных рисков лесного хозяйства.

#### **Обзор работ по оценке запаса древостоев на землях лесного фонда и влиянию антропогенных рисков на запас древостоев**

Леса в целом являются одним из факторов, обеспечивающих качество жизни человечества, выполняя атмосфераочистительную, водоохранную, защитную, экономическую и социальную функции.

Что касается оценки запаса древостоев и экономики леса, отдельные вопросы рассматривались в работах Н.В. Малышевой [3], Л.Е. Курлович [4], J.R. Brazee, P. Dwivedi [5], A. Niskanen и др. [6],

T.H. Nguyen, K. Kanemoto [7], D. Panagiotidis, A. Abdollahnejad [8]. Интересно, на наш взгляд, исследование, целью которого являлась оценка эффективности методов машинного обучения и регрессии опорных векторов для предсказания надземной биомассы лесов с 318 участков постоянной выборки с помощью датчика Landsat 8 OLI, спектральных индексов, физических переменных в Западной Сьерра-Мадре в Мексике [9].

Большое количество работ в России посвящено вопросам экономической оценки земель, преимущественно городских территорий, например, Е.Н. Быковой, О.Ю. Лепихиной, А.М. Рыбкиной и др. [10–12]. Однако некоторые учёные рассматривают в своих исследованиях экономическую оценку именно лесопокрытых земель [13, 14].

Некоторым аспектам исследования рисков посвящены труды учёных В.В. Юрак, М.А. Пашкевич, М.В. Волкодавой, А.В. Алексеенко, И.А. Стручкова и др. [15–22]. А управление рисками в лесном хозяйстве рассмотрено в работах А.Р. Безпалько [23], Т.Е. Катковой [24–26], В.Н. Петрова [27] и др.

Также существует ряд исследований, посвященных моделированию роста и развития лесов, например, работа П.В. Михайлова [28], а также вопросам обезлесения лесных территорий и вырубки, утрате биологического разнообразия лесов, например, работы Е. Han, Q. Huang и D. López-Carr [29, 30].

Одним из эффективных средств хранения больших объемов таксационных данных и выполнения пространственных запросов к ним являются геоинформационные системы [31, 32]. Особо стоит отметить работу X. Yang и др. [33], в которой в качестве переменных, влияющих на возникновение лесных пожаров, использовались двенадцать факторов, связанных с топографией, климатическими условиями, характеристиками растительности и деятельностью человека. В данной работе с помощью инструментов ГИС и Maxent построена модель оценки риска лесных пожаров, учитывающая влияние различных факторов окружающей среды на лесные пожары в провинции Хунань. В статье авторов Y. Meng, B. Cao, C. Dong, X. Dong [34] оценивалось санитарное состояние лесной горной экосистемы Тайшань с использованием метода пространственного анализа ГИС и данных наземной инвентаризации лесов.

Вопросы информационного обеспечения земель лесного фонда рассматривались в работах российских учёных Е.А. Иванцовой, А.П. Мохирева, И.Ю. Харлова и др. [35–37]. Стоит отметить, что в Российской Федерации существует ряд информационных систем земельной направленности, функционирующих онлайн. Это Публичная кадастровая карта, Региональная геоинформационная система Санкт-Петербурга, Единая федеральная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения. Также существуют подобные информационные системы, посвященные лесным насаждениям и запасам лесных ресурсов (ГИС «ЛесФонд»; интерактивная карта «Леса России» (геопортал); ЕГАИС учёта древесины и сделок с ней; леса высокой природоохранной ценности

(ЛВПЦ)) и отдельно рискам лесопользования – пожарам (ИСДМ-Рослесхоз).

Однако, если говорить об автоматизированной оценке запаса древостоев, на настоящий момент в России отсутствует программное обеспечение подобного рода. Поэтому ниже авторами предложен методический подход оценки запаса древостоев на землях лесного фонда с учетом антропогенных рисков и программное обеспечение для реализации данной задачи.

При разработке методики авторами рассмотрены и приняты во внимание существующие подходы к расчету интегрального показателя риска пожаров на землях лесного фонда [38, 39].

#### Объект исследования и создание геопространственной базы данных территории объекта исследования

Исследуемый лесной участок площадью 578,3 га – кварталы 160, 165, 166, 171, 172 Чернореченского лесничества (границы показаны красным на рис. 1). Всего в лесничество входит 143 квартала с №№ 147–289 (его границы показаны черным на рис. 1).

Изучаемая территория расположена в центральной части Ленинградской области на территории Всеевложского лесничества. Общая площадь лесничества 113145 га. Лесничество состоит из 15 участковых лесничеств, наибольшую его часть занимает Чернореченское.

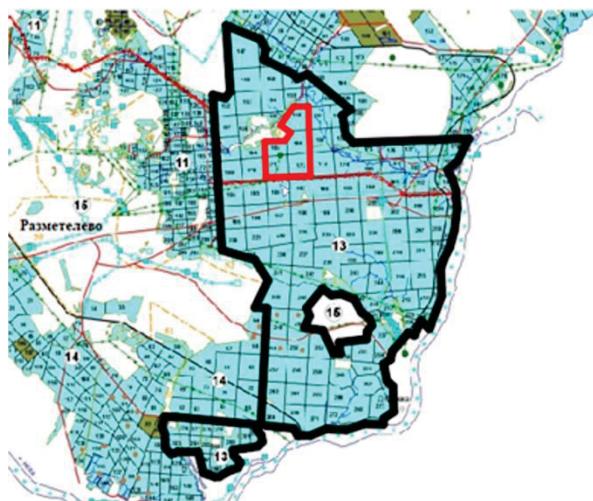


Рис. 1. Границы исследуемого лесного массива  
Fig. 1. Boundaries of the forest area under study

Сведения о границах Чернореченского лесничества внесены в Единый государственный реестр недвижимости как часть земельного участка с кадастровым номером 47:00:0000000:2. Границы самого земельного участка не установлены, в Едином государственном реестре недвижимости отсутствуют сведения о координатах характерных точек границ земельного участка. Для проведения исследования использованы данные о координатной привязке части земельного участка и определены координаты границ всех выделов путем оцифровки данных контуров. Пространственная привязка растровых данных выполняется с указанием местоположения в Местной

системе координат МСК-47 (зона 2). Пространственные данные позволяют выполнять к ним различные запросы, что очень важно при создании автоматизированной информационной системы.

На территории лесничества создан государственный природный заказник «Приневский», который располагается в восточной части Чернореченского лесничества и не затрагивает изучаемую территорию. Наличие заказника влияет на запасы древесины призывающих лесничеств.

Изучаемые кварталы граничат с дачным поселком «Березовка» общей площадью 30 га, разделенным на 200 земельных участков. Поселок построен посреди лесного массива. Расположенное неподалеку от поселка озеро Лазурное имеет песчаный пляж с благоустроенной территорией и наличием построек: кафе, спортивные и детские игровые площадки, детский городок. Дорога, по которой осуществляется проезд к озеру проходит через изучаемые кварталы, что приводит к риску возникновения пожаров на данной территории, особенно в весенне-летнее время года.

Изучаемые кварталы № 171, 172 располагаются вблизи нефтеперекачивающей станции (НПС) «Невская», которая обеспечивает транспортировку в направлении порта Приморск не только нефти, но и нефтепродуктов. С 2018 г. здесь работает пункт, обеспечивающий налив дизтоплива в автоцистерны. Расположение станции внутри лесного массива также приводит к риску возникновения пожаров на данной территории (рис. 2).

Пробладающими древесными породами на изучаемых землях является сосна обыкновенная и береза повислая. На некоторых выделах присутствует осина (тополь дрожащий), реже встречается ель европейская.

Государственная инвентаризация лесов России проводится один раз в 10 лет. В 2021 г. проводился второй этап инвентаризации лесов Ленинградской области. Для отображения динамики изменения запаса древесины использованы данные наземной таксации лесов 2011, 2021 гг., а также рассчитаны прогнозные значения показателей на 2031 г.

Геопространственная база данных земель объекта исследования создана в геоинформационной системе MAPINFO. Источниками данных являлись лесоустроительные документы последнего года инвентаризации: план лесонасаждений Чернореченского участкового лесничества и таксационные описания выделов, расположенных на землях лесничества. Сформированы следующие слои данных:

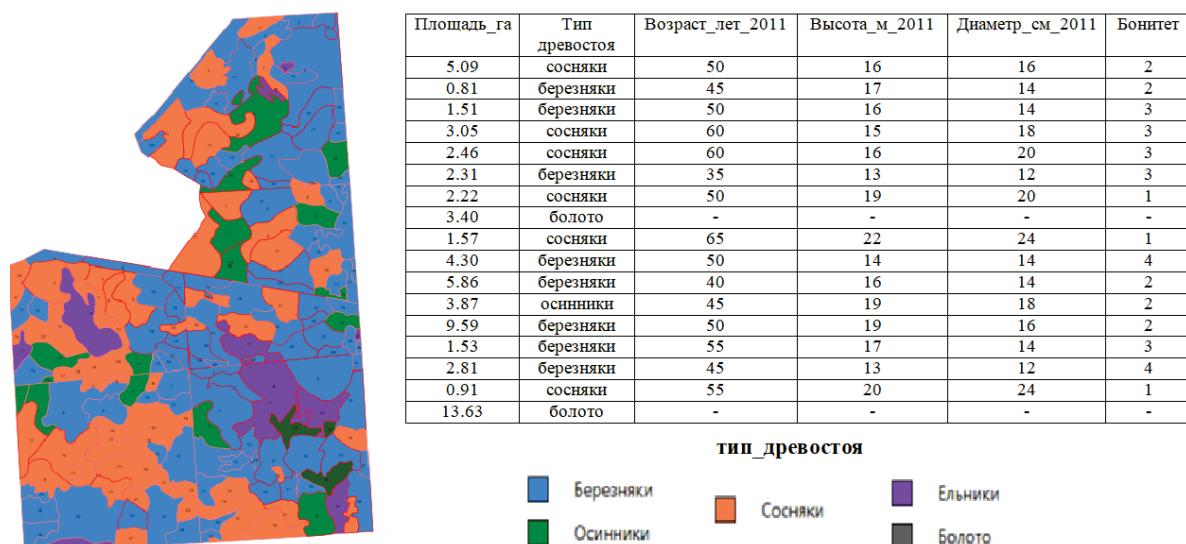
- участковые лесные кварталы (состав атрибутивных данных: учетный номер квартала; площадь, га);
- участковые выделы (состав атрибутивных данных: учетный номер выдела; учетный номер квартала; площадь; преобладающая порода; средний возраст насаждений; средняя высота; средний диаметр дерева, класс бонитета).

Графическая часть проекта и фрагмент атрибутивной базы данных представлены на рис. 3.



**Рис. 2. Расположение дачного поселка «Березовка» и нефтеперекачивающей станции «Невская» относительно лесного массива**

**Fig. 2. Location of the dacha village «Berezovka» and the oil pumping station «Nevsky»**



**Рис. 3. Графическая и атрибутивная часть геопространственной базы данных исследуемых кварталов Чернореченского лесничества**

**Fig. 3. Graphic and attributive part of the geospatial database of the studied quarters of the Chernorechensk forestry**

#### Методика исследования

Общую последовательность работ представим в виде этапов исследования (рис. 4).

Далее рассмотрим каждый из этапов подробнее.

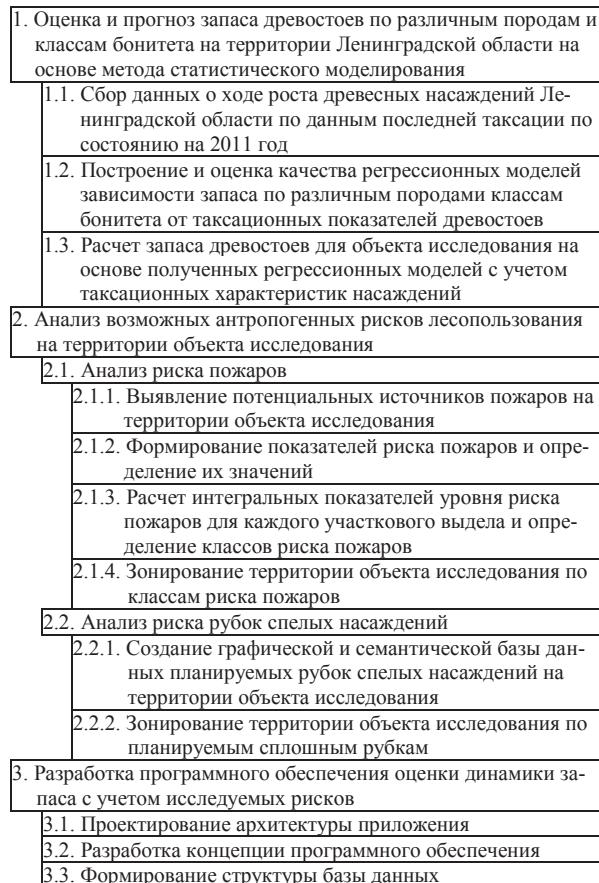
1. *Оценка и прогноз объема запаса древостоев по различным породам и классам бонитета на территории Ленинградской области на основе метода статистического моделирования.* Математическое моделирование динамики таксационных показателей широко применяется в практике лесного хозяйства в последние десятилетия. Для условий таежной зоны Ленинградской области по каждой лесообразующей породе профессором А.В. Тюриным в 1912–1930 гг. составлены всепородные таблицы хода роста насаждений на основе местных (Ленинградских) насаждений различных пород и условий местопроизрастания. Таблицы хода роста дифференцированы по классам

бонитета и по преобладающим породам. Однако для совокупности данных таксации отсутствуют математические модели. Это обстоятельство побудило авторов разработать регрессионные модели и применить их с целью расчета запасов древостоев на объекте исследования.

2. *Анализ и оценка возможных антропогенных рисков лесопользования на территории объекта исследования.* Необходимость учета рисков в лесном хозяйстве обусловлена тем, что длительность воспроизводства лесов зависит от типа лесорастительных условий и породного состава и составляет несколько десятилетий (более 60 лет).

Выбор того или иного способа количественной оценки рисков зависит от объема доступной информации о риске и требуемой точности оценок. Также приходится учитывать фактический уровень риска.

Общий принцип при выборе методов измерения сводится к максимально возможному использованию доступных статистических данных. Если их нет, они недостаточны или неприменимы, фактический материал заменяется теоретическими гипотезами или эксперты оценками.



*Рис. 4. Последовательность работ в рамках исследования*  
*Fig. 4. Sequence of work in the framework of the study*

**2.1. Пожары.** Одним из вариантов количественной оценки ущерба от пожаров может служить использование интегрального показателя риска, предусматривающего учет потенциальных источников пожарной опасности лесного фонда, а также степени их влияния на возникновение огня.

Этап формирования системы показателей при построении интегрального показателя риска является одним из ключевых. Должны удовлетворяться следующие требования: показатель должен отражать рассматриваемый фактор; быть доступным в официальной статистике, иметь числовые значения в одной из информационных баз, быть простым в измерении характеристик и представлять возможность сопоставления (сравнения); должен иметь возможность построения и интерпретации интегрального показателя [73].

В качестве показателей риска пожаров нами предлагается использовать доступность потенциальных источников пожара. Количественно оценить эти показатели предлагается путем измерения расстояния от выдела до ближайшего объекта соответствующего показателя.

Этап построения интегрального показателя риска включает такие процедуры, как нормирование, взвешивание и агрегирование. Для целей агрегирования использован метод по сумме средневзвешенных арифметических групповых показателей, на основании которого расчет интегрального показателя риска ( $I_k$ ) производится по формуле (1):

$$I_k = \sum_{i=1}^n K_{ij} \cdot L_j, \quad (1)$$

где  $K_{ij}$  – нормированное значение  $j$ -го показателя риска для  $i$ -го объекта;  $L_j$  – вес  $j$ -го показателя риска.

С целью нормирования показателей риска использован метод «минимум–максимум», достоинством которого является сохранение разброса значений показателей. Расчет нормированного показателя  $K_{ij}$  производится по формуле (2):

$$K_{ij} = 1 - \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}}, \quad (2)$$

где  $X_{ij}$  – значение  $j$ -го показателя риска  $i$ -го оцениваемого объекта;  $X_{\min j}$  – минимальное значение  $j$ -го показателя риска по всем оцениваемым объектам;  $X_{\max j}$  – максимальное значение  $j$ -го показателя риска по всем оцениваемым объектам.

**2.2. Сплошные рубки спелых древостоев и самовольные (незаконные) рубки.** При сплошных рубках весь древостой на лесосеке вырубается за один прием. Для сохранения природной среды при сплошной рубке спелого леса необходимо соблюдать организационно-технические показатели рубок (ширину лесосеки, направления лесосеки и рубки, способ и срок примыкания лесосек и число зарубов).

В Российской Федерации около 60 % спелого леса находится в аренде. Заготовку древесины ведут арендаторы лесного фонда, которые не заинтересованы в соблюдении организационно-технических показателей рубок спелых и перестойных насаждений по экономическим соображениям. После сплошных механизированных рубок леса отмечаются отрицательные экологические последствия не только на лесосеке, но и на соседних кварталах. Нарушения проявляются в следующем: усиление поверхностного стока, формирование глеевого горизонта почвы, заболачивание вырубки, уменьшение в почве элементов питания и микроэлементов, нарушение гидрологического режима рек, увеличение бактериального загрязнения воды, обеднение видового разнообразия флоры и фауны, смена ценных хвойных пород второстепенными мелколиственными, уменьшение стока углерода из атмосферы и нарушение глобального углеродного цикла. При самовольных рубках ежегодно вырубается более 1,6 тыс. м<sup>3</sup> древесины, ущерб составляет более 11288,6 млн р.

**3. Программное обеспечение оценки и прогнозирования запасов древостоев с учетом антропогенных рисков.** С целью повышения эффективности оценки запасов древостоев, а также анализа и учета различных рисков лесопользования авторским коллективом разработан программный продукт «Программа для оценки и прогноза запасов древостоев с учетом антропогенных рисков».

Данный программный продукт предназначен для выполнения следующих задач: 1) расчет запаса древесных пород; 2) оценка риска возникновения пожаров в лесу; 3) оценка риска сплошных и самовольных рубок.

На первом этапе проектирование архитектуры программного обеспечения заключалось в выборе структурных элементов и их интерфейсов, а также их поведения в рамках сотрудничества структурных элементов. На втором этапе проводилось соединение выбранных элементов структуры в более крупные системы. На третьем этапе определен архитектурный стиль будущего программного обеспечения. В заключение осуществлена организация функционирования системы – элементов и интерфейсов, их сотрудничество и соединение.

Концептуально разрабатываемое программное обеспечение определено как автоматизированное средство по расчету запасов древесины различных пород, произрастающих на лесных кварталах и выделах, и отображению полученных значений запаса в виде столбчатых диаграмм, а также визуализации данных по антропогенным рискам (пожары и сплошные рубки) в виде тематических карт.

Структура базы данных программы представляет собой набор векторных данных формата \*.MIF/\*.MID и соответствующие им наборы атрибутивных сведений, содержащих таксационные характеристики лесных насаждений.

Работа программы возможна под управлением операционной системы Windows 10. Для работы программы необходимо наличие установленной программной платформы (в дистрибутив не входит) .NET framework 4.7.2 или более старшей версии.

## Результаты

1. Оценка и прогноз объема запаса древостоев по различным породам и классам бонитета на территории Ленинградской области на основе метода статистического моделирования.

На основе статистической обработки данных хода роста насаждений различных пород Ленинградской области получены значимые (с коэффициентом детерминации  $R^2$ , превышающим значение 0,9) регрессионные уравнения зависимости запаса насаждений ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) от среднего возраста породы по каждому из пяти классов бонитета. Графики полученных зависимостей по породам представлены на рис. 5.

На основе полученных зависимостей рассчитан запас древостоев на 1 га и на общую площадь для каждого выдела объекта исследования в зависимости от преобладающей породы и класса бонитета. Так как учет запаса древостоев производится по каждому таксационному кварталу лесничества, в дальнейшем рассчитаны суммарные запасы на 2011, 2021 гг. и прогнозные значения на 2031 г. по каждой породе (рис. 6).

По полученным математическим моделям был осуществлён расчет запасов древостоев для объекта исследования, что позволяет осуществлять учет, управление и планирование лесным хозяйством.

2. Результаты анализа и оценка возможных антропогенных рисков лесопользования на объекте исследования. Для территории объекта исследования такими источниками являются: жилой массив (СНТ «Березовка»), НПС «Невская», автомобильные дороги, тропиночная сеть.

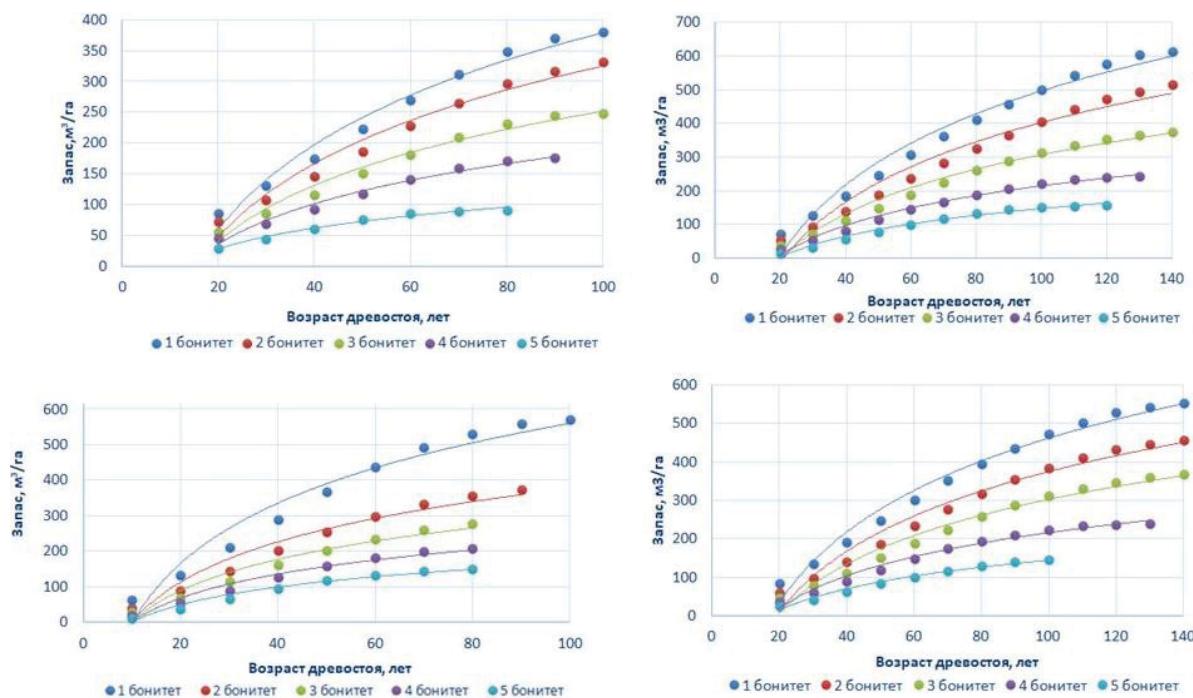


Рис. 5. Динамика запаса бересовых насаждений (слева вверху), еловых насаждений (справа вверху), осиновых насаждений (слева внизу), сосновых насаждений (справа внизу)

Fig. 5. Dynamics of the stock of birch plantations (top left), spruce plantations (top right), aspen plantations (bottom left), pine plantations (bottom right)

Пло- щадь_га	Тип древостоя	Возраст_лет_2011	Высота_м_2011	Диаметр_см_2011	Бонитет
5.09	сосняки	50	16	16	2
0.81	березняки	45	17	14	2
1.51	березняки	50	16	14	3
3.05	сосняки	60	15	18	3
2.46	сосняки	60	16	20	3
2.31	березняки	35	13	12	3
2.22	сосняки	50	19	20	1
3.40	болото	—	—	—	—
1.57	сосняки	65	22	24	1
4.30	березняки	50	14	14	4
5.86	березняки	40	16	14	2
3.87	осинники	45	19	18	2
9.59	березняки	50	19	16	2
1.53	березняки	55	17	14	3
2.81	березняки	45	13	12	4
0.91	сосняки	55	20	24	1
13.63	болото	—	—	—	—

Рис. 6. Суммарные запасы древостоев различных пород на 2011, 2021 и 2031 гг. (прогноз)

Fig. 6. Total stocks of stands of various breeds for 2011, 2021 and 2031 (forecast)

В качестве  $X_j$  учитываются следующие показатели риска:  $X_1$  – расстояние до СНТ «Березовка»,  $X_2$  – расстояние до НПС «Невская»,  $X_3$  – расстояние до ближайшей автомобильной дороги,  $X_4$  – расстояние до ближайшей тропинки. Для сбора данных о значениях вышеприведенных показателей риска пожаров были использованы средства геопространственного анализа MAPINFO (рис. 7).

Вес ( $L_j$ ) каждого показателя определялся на основании мнения авторского коллектива, и его значения для показателей  $X_1$ – $X_4$  составили соответственно 0,2; 0,3; 0,1; 0,4. При задании веса коллектив руководствовался имеющимися статистическими данными о возникших на территории Ленинградской области пожарах за 2020 г., размещенными на сайте Главного управления Министерства чрезвычайных ситуаций по Ленинградской области.

Далее по формуле (1) были рассчитаны интегральные коэффициенты риска пожаров для каждого выдела. По значениям рассчитанных интегральных коэффициентов риска пожаров построена тематическая карта, иллюстрирующая зонирование территории объекта исследования по трем уровням риска: высокий, средний, умеренный (рис. 8, а).

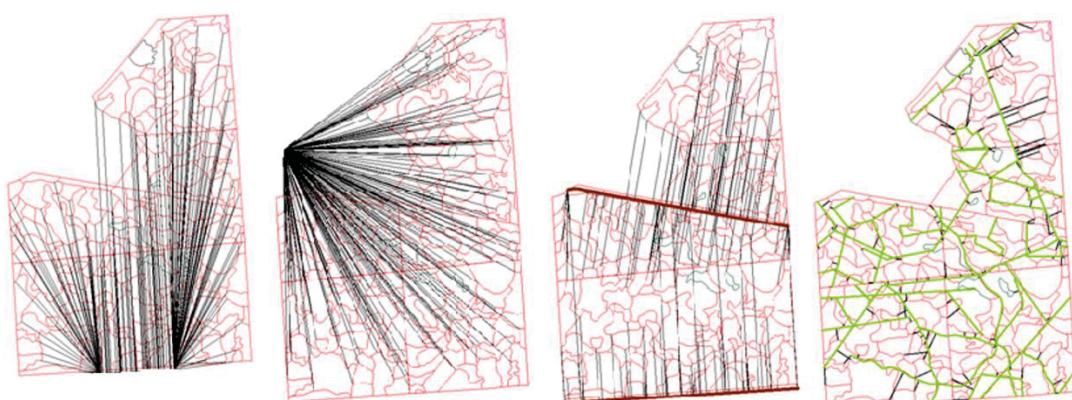


Рис. 7. Использование инструментов пространственного анализа ГИС для определения расстояний до потенциальных источников пожара

Fig. 7. Using GIS spatial analysis tools to determine distances to potential fire sources

Проведенный анализ риска сплошной и самовольной рубки позволил сформировать тематическую карту, наглядно иллюстрирующую лесные земли с полной вырубкой древостоя к 2031 г. (рис. 8, б).

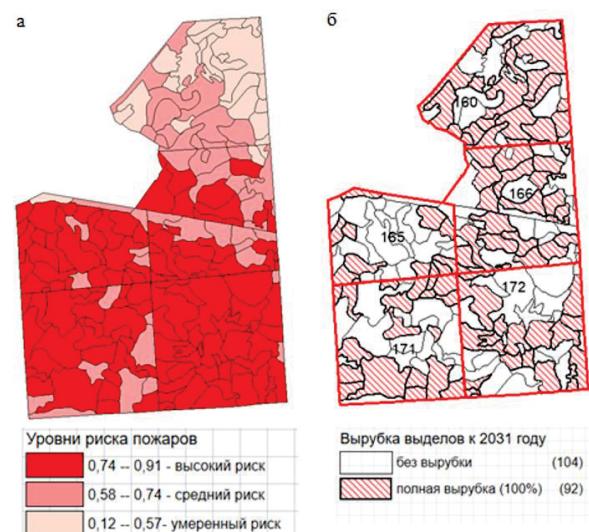


Рис. 8. Зонирование земель объекта исследования по: а) уровню риска пожаров; б) риску сплошной рубки главного пользования

Fig. 8. Zoning of the lands of the object of study according to: a) the level of risk of fires; б) the risk of continuous logging of the main use

3. Возможности программного обеспечения оценки и прогноза запасов древостоев с учетом антропогенных рисков. Созданное авторами программное обеспечение является инструментом по автоматизации предлагаемых методических решений. Рабочая область приложения включает в себя область карты выделов объекта исследования, а также набор вспомогательных меню (рис. 9).

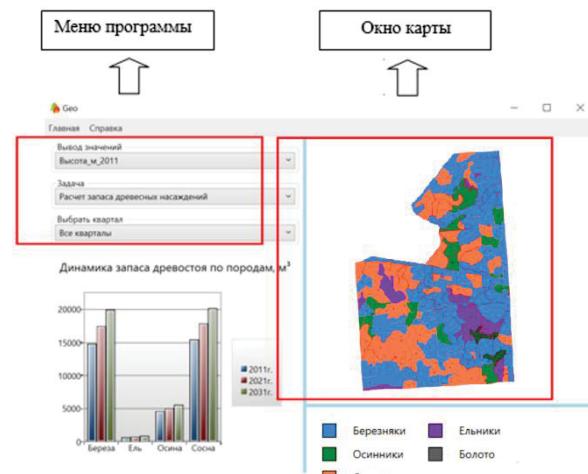


Рис. 9. Интерфейс программы  
 Fig. 9. Program interface

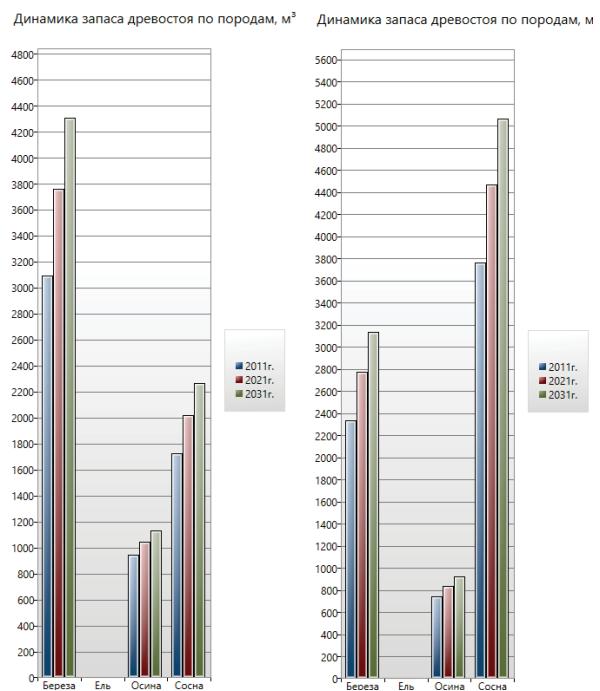


Рис. 10. Иллюстрация диаграмм запасов древостоев для кварталов 160 и 165

Fig. 10. Diagrams of stand stocks for districts 160 and 165

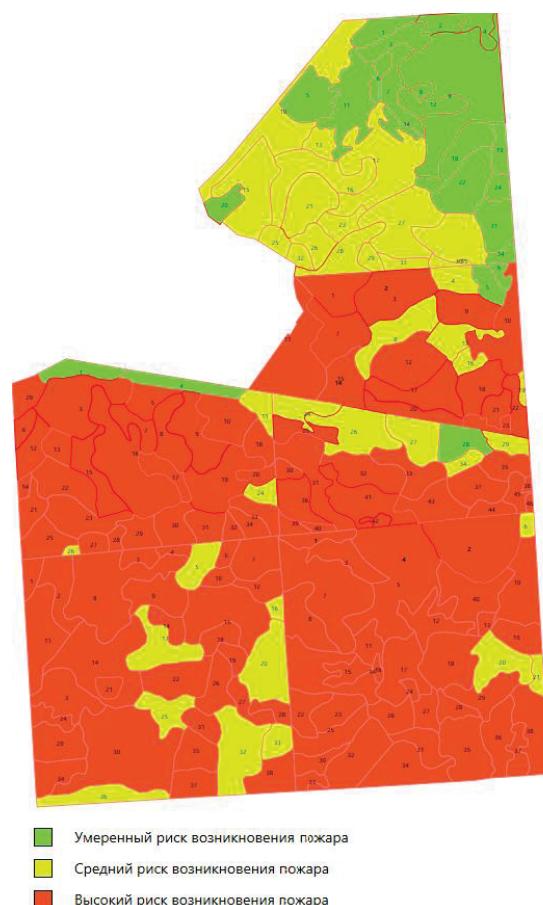


Рис. 11. Иллюстрация карты риска пожаров и вырубки древостоя  
 Fig. 11. Illustration of the fire risk map and felling of a stand



Меню «Вывод значений» позволяет наглядно отображать заданные характеристики насаждений выделов, такие как преобладающая порода, возраст, средний диаметр, средняя высота и т. д. Меню «Задача» позволяет выбрать требуемую задачу из списка и осуществить наглядную визуализацию результатов ее решения в окне карты. Меню «Выбрать квартал» позволяет отображать заданный таксационный квартал в окне карты либо все кварталы одновременно. При выборе конкретного квартала (или всей совокупности кварталов) на диаграмме отображается динамика запасов древостоев по породам на 2011, 2021 и 2031 гг. (рис. 10).

Помимо решения задач расчета запасов древостоев программа позволяет формировать и наглядно отображать карты риска пожаров и сплошных рубок леса (рис. 11). Также в программе предусмотрена возможность импорта новых данных из ГИС MAPINFO. Для импорта данных необходимо в ГИС подготовить файл для экспорта. Экспорт осуществляется посредством файлов формата \*.MIF/\* .MID. данный файл должен содержать в себе векторные карты регионов и базу данных таксационных характеристик древостоев.

## Выводы

Результатом проведенного авторами исследования является формирование программно-методического обеспечения одной из задач правительственного документа, связанной с созданием федеральной географической информационной системы (ФГИС) для определения запаса древесных ресурсов, начиная от лесного участка и заканчивая местом реализации.

Для решения данной задачи авторами разработано программное обеспечение оценки накопления запаса насаждения с возрастом древостоя с учетом антропогенных рисков, которое апробировано на тестовых лесных участках Ленинградской области в Балтийско-Белозерском таежном районе.

Одним из достоинств созданного программного обеспечения является возможность импортирования в его среду векторных данных различных форматов. В дальнейшем планируется определять не только таксационные показатели древостоев, но и оценивать условия местопроизрастания древесно-кустарниковой растительности (тип почвы, рельеф, экспозиция склона, гидрологические и климатические условия). Предлагаемое программное обеспечение определения запаса древостоев может быть использовано при осуществлении комплексной оценки продуктивности земель лесного фонда в различных субъектах Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Федерального бюджетного института «Авиалесоохрана». URL: <https://aviales.ru> (дата обращения 13.11.2021).
2. Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 №312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573658653> (дата обращения 11.11.2021)
3. Количественная оценка запасов древесного детрита в лесах Российской Федерации по данным ГИЛ / Н.В. Малышева, А.Н. Филипчук, Т.А. Золина, Г.В. Сильянина // Лесохозяйственная информация. – 2019. – № 1. – С. 101–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.09>
4. Курлович Л.Е., Косицын В.Н., Цареградская С.Ю. Совершенствование методов учета и оценки запасов недревесных ресурсов леса на современном этапе // Лесохозяйственная информация. – 2019. – № 3. – С. 73–81. DOI: <http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.06>
5. Brazee J.R., Dwivedi P. Optimal forest rotation with multiple product classes // Forest Science. – 2015. – V. 61. – № 3. – P. 458–465. DOI: <https://doi.org/10.5849/forsci.13-207>
6. Niskanen A., Petrov A., Filoushkin G. Economic accessibility of forest resources in Northwest Russia // EFI Proceedings. – 2004. – V. 48. – P. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.198346>
7. Nguyen T.H., Kanemoto K. Mapping the deforestation footprint of nations reveals growing threat to tropical forests // Nature Ecology & Evolution. – 2021. – V. 5. – P. 845–853. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01417-z>
8. Panagiotidis D., Abdollahnejad A. Accuracy assessment of total stem volume using close-range sensing: advances in precision forestry // Forests. – 2021. – V. 12. – № 717. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12060717>
9. Modeling of aboveground biomass with Landsat 8 OLI and machine learning in temperate forests / P.M. López-Serrano, J.L. Cárdenas Domínguez, J.J. Corral-Rivas, E. Jiménez, C.A. López-Sánchez, D.J. Vega-Nieva // Forests. – 2020. – V. 11. – № 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010011>
10. Быкова Е. Н. Оценка негативных инфраструктурных экстенсионных при определении стоимости земель // Записки Горного института
11. Лепихина О.Ю., Балтыжакова Т.И., Рагузин И.И. Перспективы применения методов машинного обучения в кадастровой оценке недвижимости // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. – 2020. – № 1. – С. 48–50.
12. Rybkin A.M., Demidova P.M., Kiselev V.A. Working-out of the geostatistical model of mass cadastral valuation of Urban lands evidence from the city Vsevolozhsk (Russia) // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – V. 11 (24). – P. 11631–11638.
13. Kovayzin V.F., Kitsenko A.A., Shobairi S.O.R. Cadastral valuation of forest lands, taking into account the degree of development of their infrastructure // Journal of Mining Institute. – 2021. – V. 249. – P. 449–462. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.14>
14. Алгоритм массовой кадастровой оценки лесных земель по таксационным показателям насаждений / А.Ю. Романчиков, В.Ф. Ковязин, Н.И. Животягина, А.А. Киценко, Л.А.Т. Данг // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2890>
15. Юрак В.В., Душин А.В., Мочалова Л.А. Против устойчивого развития: сценарии будущего // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 242–247. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.242.76700>
16. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg / M.A. Pashevich, J. Bech, V.A. Matveeva, A.V. Alekseenko // Journal of Mining Institute. – 2020. – V. 241. – P. 125–130. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.125>
17. Pashkevich M.A., Petrova T.A. Technogenic impact of sulphide-containing wastes produced by ore mining and processing at the ozernoe deposit: investigation and forecast // Journal of Ecological Engineering. – 2017. – V. 18 (6). – P. 127–133. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/76700>
18. Волкодава М. В., Киселев А.В. О развитии системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха // Записки Горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 589–596. DOI: <https://doi.org/10.25515/pmi.2017.5.589>

19. Alekseenko A.V., Drebendstedt C., Bech J. Assessment and abatement of the eco-risk caused by mine spoils in the dry subtropical climate // Environmental Geochemistry and Health. – 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00885-3>
20. Struchkov I.A., Rogachev M.K. Risk of wax precipitation in oil well // Natural Resources Research. – 2017. – Iss. 1. – V. 26. – P. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11053-016-9302-7>
21. Carranza J.R.Z., Kovshov S., Lyubin E. Assessment of anthropogenic factor of accident risk on the main oil pipeline pascuales-cuenca in Ecuador // Journal of Applied Engineering Science. – 2018. – Iss. 3. – V. 16. – P. 307–312. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes16-17019>
22. Sannikova A.P., Bazykina L.R., Ozhigin D.S. Methodology for effective determination of rock jointing in calculation of open pit edges // Journal of Industrial Pollution Control. – 2017. – Iss. 1. – V. 33. – P. 852–855.
23. Безпалько А.Р. Экономический механизм перераспределения рисков при сохранении лесов: автореф. дис. ... канд. экон. наук. – СПб, 2003. – 20 с.
24. Каткова Т.Е. Управление рисками в лесном хозяйстве: автореф. дис. ... канд. экон. наук. – Йошкар-Ола, 2006. – 22 с.
25. Каткова Т.Е. Риски в лесном хозяйстве: сущность и виды в современных условиях хозяйствования // Проблемы анализа риска. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 30–37.
26. Каткова Т.Е. Развитие теории и методов управления рисками возникновения лесных пожаров // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2020. – № 58. – С. 24–27.
27. Petrov V.N., Katkova T.E., Vinogradova E.V. Risk management of forest fire occurrence // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IV scientific-technical conference «Forests of Russia: policy, industry, science and education». – 2019. – 012050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012050>
28. Modeling of growth and development of spruce stands in the West Siberian South taiga plain forest region / P.V. Mikhaylov, S.L. Shevelev, S.M. Sul'tson, S.V. Verkhovets, A.A. Goroshko // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 677 (5). – 052121. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052121>
29. Han E., Huang Q. Global commodity markets, Chinese demand for maize, and deforestation in Northern Myanmar // Land. – 2021. – V. 10. – № 1232. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10111232>
30. Han E., Huang Q. A review of small farmer land use and deforestation in tropical forest frontiers: implications for conservation and sustainable livelihoods // Land. – 2021. – V. 10. – № 1113. DOI: <https://doi.org/10.3390/land1011113>
31. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии / Ж.Т. Кожаев, М.А. Мухамедгалиева, Б.Б. Имансакипова, М.Г. Мустафин // Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.07>
32. GIS-based urban afforestation spatial patterns and a strategy for pm2.5 removal / Y. Zhou, H. Liu, J. Zhou, M. Xia // Forests. – 2019. – V. 10. – № 875. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10100875>
33. Yang X., Jin X., Zhou Y. Wildfire risk assessment and zoning by integrating Maxent and GIS in Hunan province, China // Forests. – 2021. – V. 12. – № 1299. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101299>
34. Mount Taishan forest ecosystem health assessment based on forest inventory data / Y. Meng, B. Cao, C. Dong, X. Dong // Forests. – 2019. – V. 10. – № 657. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10080657>
35. Иванцова Е.А. Информационное обеспечение земель лесного фонда для их государственного кадастрового учета // Интерэкско Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 2. – № 3. – С. 173–182.
36. Assessment of availability of wood resources using geographic information and analytical systems (the Krasnoyarsk Territory as a case study) / A.P. Mokhirev, M.O. Pozdnyakova, S.O. Medvedev, V.O. Mammatov // Journal of Applied Engineering Science. – 2018. – V. 16. – № 3. – P. 313–319. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes16-16908>
37. Харлов И.Ю., Николаев А.И., Кулагин А.А. Учёт лесных ресурсов и организация их использования в федеральной информационной системе // Известия ОГАУ. – 2013. – № 5 (43). – С. 8–10.
38. Клюшникова Е.В., Шитова Е.М. Методические подходы к расчету интегрального показателя, методы ранжирования // Электронный научно-практический журнал «ИнноЦентр». – 2016. – № 1 (10). – С. 4–18.
39. Зенченко С.В., Бережной В.И. Система интегральной оценки финансового потенциала региона и методика ее формирования // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2010. – № 2 (15).

Поступила 15.06.2022 г.

#### Информация об авторах

**Лепихина О.Ю.**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

**Демидова П.М.**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

**Колесник О.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

**Ковязин В.Ф.**, доктор биологических наук, профессор кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

**Гурьева О.С.**, аспирант кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

**Басова Л.А.**, аспирант кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 630\*5:630\*91:004:528.946:349.415

## ASSESSMENT OF THE GROWING STOCK OF FOREST FUND LANDS TAKING INTO ACCOUNT ANTHROPOGENIC RISKS: SOFTWARE AND METHODOLOGICAL SUPPORT

**Olga Yu. Lepikhina<sup>1</sup>,**  
Lepikhina\_OYu@pers.spmi.ru

**Polina M. Demidova<sup>1</sup>,**  
Demidova\_PM@pers.spmi.ru

**Olga A. Kolesnik,**  
Kolesnik\_OA@pers.spmi.ru

**Vasily F. Kovyazin,**  
vkedr@mail.ru

**Olga S. Gureva,**  
olga.gureva1995@gmail.com

**Lidiya A. Basova,**  
s205051@stud.spmi.ru

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

**The relevance.** The task of providing automated accounting, assessment and forecasting of forest resources is one of the most important directions of the state strategy for the development of the forest complex. Creation of an automated information system capable of implementing a high-quality and full-fledged information process for collecting, processing, analyzing, modeling, forecasting and visualizing spatiotemporal data on the state of forest resources, taking into account the main risks of forestry, is one of the important mechanisms for improving the efficiency of forest management.

**The main aim:** to create methodological and software for assessing the stock of wood resources on the lands of the forest fund, taking into account anthropogenic risks.

**Objects:** forest plantations of the Chernorechensk district forestry of the Vsevolozhsky forestry of the Leningrad region.

**Methods.** Based on the use of regression modeling methods, mathematical models of the dependence of the stock of plantings of various tree species on the average age of the stand in the forest allotment are obtained; the basis of the developed software is based on the author's methodological solutions for assessing and forecasting the stock of wood.

**Results.** The application of the obtained dependencies for the Chernorechensk forestry of the Vsevolozhsky district of the Leningrad region made it possible to calculate the values of the wood stock as of 2011 and 2021, as well as to predict its values for 2031. A methodology for assessing fire damage on forest lands based on an integral risk indicator is proposed. Automation of the calculation of this indicator in the created program made it possible to differentiate forestry lands by three classes of fire risk. A zoning map of the territory of the object of research on the risk of continuous and unauthorized logging has been formed. The created software and methodological support can serve as a basis for the implementation of one of the main directions of the strategy for the development of the Russian forest complex in terms of creating a unified federal information system for accounting and forecasting the current increase in the stock of wood resources of the forest fund.

### Key words:

forest stands, stock of stands, automation of forest resources accounting, anthropogenic risks, fire assessment methodology.

### REFERENCES

1. *Oifitsialnyi sayt Federalnogo byudzhetnogo instituta «Avialesokhrana»* [Official website of the Federal Budget Institute «Avialesohrana»]. Available at: <https://aviales.ru> (accessed 13 November 2021).
2. *Rasporyazheniye Pravitelstva RF ot 11.02.2021 № 312-r «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda»* [The resolution of the RF Government dated 11 February 2020, No. 312-r «On approval of the Strategy for development of the forest complex of the Russian Federation until 2030»]. Electronic fund of legal and regulatory documents. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573658653> (accessed 11 November 2021).
3. Malysheva N., Filipchuk A., Zolina T., Silnyagina G. Quantitative assessment of coarse woody debris in the forests of the Russian Federation according to the State forest inventory data. *Forestry information*, 2019, no. 1, pp. 101–128. In Rus. DOI: 10.24419/LHI.2304–3083.2019.1.09
4. Kurlovich L., Kositsin V., Tsaregradskaya S. Current improvement of non-wood forest resource inventory and assessment procedures. *Forestry information*, 2019, no. 3, pp. 73–81. In Rus. DOI: <http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.06>
5. Braze J.R., Dwivedi P. Optimal forest rotation with multiple product classes. *Forest Science*, 2015, vol. 61, no 3, pp. 458–465. DOI: <https://doi.org/10.5849/forsci.13-207>
6. Niskanen A., Petrov A., Filoushina G. Economic accessibility of forest resources in Northwest Russia. *EFI Proceedings*, 2004, vol. 48, pp. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.198346>
7. Nguyen T.H., Kanemoto K. Mapping the deforestation footprint of nations reveals growing threat to tropical forests. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, vol. 5, pp. 845–853. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01417-z>
8. Panagiotidis D., Abdollahnejad A. Accuracy assessment of total stem volume using close-range sensing: advances in precision forestry. *Forests*, 2021, vol. 12, pp. 717. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12060717>

9. López-Serrano P.M., Cárdenas Domínguez J.L., Corral-Rivas J.J., Jiménez E., López-Sánchez C.A., Vega-Nieva D.J. Modeling of aboveground biomass with Landsat 8 OLI and machine learning in temperate forests. *Forests*, 2020, vol. 11, pp. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl1010011>
10. Bykova E.N. Assessment of negative infrastructural externalities when determining the land value. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 247, pp. 154–170. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.16>
11. Lepikhina O.Yu., Baltyzhakova T.I., Raguzin I.I. Prospects for the application of machine learning methods in the cadastral valuation of real estate. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Ekonomika i pravo*, 2020, no. 1, pp. 48–50. In Rus.
12. Rybkina A.M., Demidova P.M., Kiselev V.A. Working-out of the geostatistical model of mass cadastral valuation of Urban lands evidence from the city Vsevolozhsk (Russia). *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11 (24), pp. 11631–11638.
13. Kovayzin V.F., Kitsenko A.A., Shobairi S.O.R. Cadastral valuation of forest lands, taking into account the degree of development of their infrastructure. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 249, pp. 449–462. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.14>
14. Romanchikov A.Yu., Kovayzin V.F., Zhivotyagina N.I., Kitcenko A.A., Dang L.A.T. Algorithm of forestland mass cadastral evaluation using forest inventory data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 108–116. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2890>
15. Yurak V.V., Dushin A.V., Mochalova L.A. Vs sustainable development: scenarios for the future. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 242, pp. 242–247. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.242>
16. Pashkevich M.A., Bech J., Matveeva V.A., Alekseenko A.V. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 125–130. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.125>
17. Pashkevich M.A., Petrova T.A. Technogenic impact of sulphide-containing wastes produced by ore mining and processing at the ozernoe deposit: investigation and forecast. *Journal of Ecological Engineering*, 2017, vol. 18 (6), pp. 127–133. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/76700>
18. Volkodaeva M.V., Kiselev A.V. On development of system for environmental monitoring of atmospheric air quality. *Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 227, pp. 589–596. DOI: <https://doi.org/10.25515/pmi.2017.5.589>
19. Alekseenko A.V., Drebenstedt C., Bech J. Assessment and abatement of the eco-risk caused by mine spoils in the dry subtropical climate. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00885-3>
20. Struchkov I.A., Rogachev M.K. Risk of wax precipitation in oil well. *Natural Resources Research*, 2017, vol. 26 (1), pp. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11053-016-9302-7>
21. Carranza J.R.Z., Kovshov S., Lyubin E. Assessment of anthropogenic factor of accident risk on the main oil pipeline pascuales-cuenca in Ecuador. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16 (3), pp. 307–312. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes16-17019>
22. Sannikova A.P., Bazykina L.R., Ozhigin D.S. Methodology for effective determination of rock jointing in calculation of open pit edges. *Journal of Industrial Pollution Control*, 2017, vol. 33 (1), pp. 852–855.
23. Bezpalko A.R. *Ekonicheskiy mehanizm pereraspredeleniya riskov pri sokhranenii lesov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Economic mechanism for redistributing risks while preserving forests. Cand. Diss. Abstract]. Saint-Petersburg, 2003. 20 p.
24. Katkova T.E. *Upravlenie riskami v lesnom khozyaystvye*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Risk management in forestry. Cand. Diss. Abstract]. Yoshkar-Ola, 2006. 22 p.
25. Katkova T.E. Riski v lesnom khozyaystvye: sushchnost i vidy v sovremennykh usloviyakh khozyaystvovaniya [Risks in forestry: the essence and types in modern economic conditions]. *Problems of risk analysis*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 30–37.
26. Katkova T.E. Development of forest fire risk management theory and methods. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 58, pp. 24–27.
27. Petrov V.N., Katkova T.E., Vinogradova E.V. Risk management of forest fire occurrence. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IV scientific-technical conference «Forests of Russia: policy, industry, science and education»*, 2019, paper 012050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012050>
28. Mikhaylov P.V., Shevelev S.L., Sultson S.M., Verkhovets S.V., Goroshko A.A. Modeling of growth and development of spruce stands in the West Siberian South taiga plain forest region. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 677 (5), paper 052121. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052121>
29. Han E., Huang Q. Global commodity markets, Chinese demand for maize, and deforestation in Northern Myanmar. *Land*, 2021, vol. 10, no. 1232. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10111232>
30. López-Carr D. A review of small farmer land use and deforestation in tropical forest frontiers: implications for conservation and sustainable livelihoods. *Land*, 2021, vol. 10, no. 1113. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10111113>
31. Kozhaev Zh.T., Muhamedgalieva M.A., Imansakipova B.B., Mustafin M.G. Geoinformatsionnaya sistema geomekhanicheskogo monitoringa rudnykh mestorozhdeniy s ispolzovaniem metodov kosmicheskoy radiolokatsionnoy interferometrii [Geoinformation system for geomechanical monitoring of ore deposits using methods of space radar interferometry]. *Gorny zhurnal*, 2017, no. 2, pp. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.07>
32. Zhou Y., Liu H., Zhou J., Xia M. GIS-Based urban afforestation spatial patterns and a strategy for pm2.5 removal. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 875. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10100875>
33. Yang X., Jin X., Zhou Y. Wildfire risk assessment and zoning by integrating Maxent and GIS in Hunan province, China. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 1299. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101299>
34. Meng Y., Cao B., Dong C., Dong X. Mount Taishan forest ecosystem health assessment based on forest inventory data. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 657. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10080657>
35. Ivanctsova E.A. Informatsionnoe obespechenie zemel lesnogo fonda dlya ikh gosudarstvennogo kadastrovogo ucheta [Information support of forest fund lands for their state cadastral registration]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Interekspo Geo-Sibir-2018* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberi-2018. International Scientific Conference]. Novosibirsk, SSGA Publ., 2018. Vol. 2, no. 3, pp. 173–182.
36. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammatov V.O. Assessment of availability of wood resources using geographic information and analytical systems (the Krasnoyarsk Territory as a case study). *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 313–319. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes16-16908>
37. Harlov I.Yu., Nikolaev A.I., Kulagin A.A. Uchet lesnykh resursov i organizatsiya ikh ispolzovaniya v federalnoy informatsionnoy sisteme [Accounting of forest resources and organization of their use in the federal information system]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 5 (43), pp. 8–10.
38. Klyushnikova E.V., Shitova E.M., Methodological approaches to calculation of integral index, ranking methods. *InnoCentre Electronic Journal*, 2016, no. 1 (10), pp. 4–18.
39. Zenchenko S.V., Careful V.I. System of an integrated estimation of financial potential of region and technique of its formation. *Regional problems of economic transformation*, 2010, no. 2 (15).

Received: 15 June 2022.

**Information about the authors**

*Olga Yu. Lepikhina*, Cand Sc., associate professor, Saint Petersburg mining university.

*Polina M. Demidova*, Cand Sc., associate professor, Saint Petersburg mining university.

*Olga A. Kolesnik*, Cand Sc., associate professor, Saint Petersburg mining university.

*Vasiliy F. Kovyazin*, Dr. Sc., professor, Saint Petersburg mining university.

*Lidiya A. Basova*, postgraduate student, Saint Petersburg mining university.

*Olga S. Gureva*, postgraduate student, Saint Petersburg mining university.

## ПРОСТАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЗЕРНА

Кирста Юрий Богданович<sup>1</sup>,  
kirsta@iwep.ru

Пузанов Александр Васильевич<sup>1</sup>,  
puzanov@iwep.ru

Рождественская Тамара Анатольевна<sup>1</sup>,  
rtamara@iwep.ru

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН,  
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

**Цель:** разработка универсальной интегрированной методологии и статистико-имитационной модели для долгосрочного прогноза содержания токсичных химических элементов в урожаях зерновых культур.

**Объекты.** Исследование основано на системном подходе и проведено на примере пшеницы, выращиваемой в Алтайском крае – одном из основных зернопроизводящих регионов России. Образцы пшеницы были отобраны в 10 районах, несколько отличающихся по климатическим условиям. Всего было изучено содержание 19 химических элементов (Pb, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn, Al, As, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, P). Показано, что концентрации Pb (свинец), Cr (хром), Cu (медь) и Na (натрий) в зерне пшеницы зависят от климатических особенностей района возделывания.

**Методы.** Установлены регрессионные зависимости содержания элементов от среднемноголетних месячных значений температуры воздуха и осадков. На основе регионального векового климатического цикла, нормализации и пространственного обобщения температуры воздуха и осадков, обеспечивающих единобразную динамику их относительных месячных значений (в процентах) по всему исследуемому региону, был составлен прогноз их изменений к 2030 г.

**Результаты.** Процедура отбора проб зерна, ГИС-технологии для обработки метеорологических и картографических данных, методы прогнозирования изменений климата и определения количественных взаимосвязей содержания химических элементов в зерне с климатическими характеристиками – все вместе составляют методологию, позволившую разработать прогнозистическую модель содержания токсичных веществ в пшенице. Модель использована для оценки изменений Pb, Cr, Cu и Na в зерне пшеницы к 2030 г. Содержание других элементов в пшенице слабо коррелирует с многолетними изменениями температуры воздуха и осадков, поэтому оно вряд ли может существенно изменяться. После 2030 г. концентрации Pb, Co (кобальт) и Cr в пшенице, поставляемой на элеваторы из некоторых муниципальных районов, превысят их допустимые уровни для продовольственного зерна.

### Ключевые слова:

Зерно пшеницы, тяжелые металлы, прогноз, климат, Россия.

### Введение

Проблема неблагоприятного воздействия изменений климата на качество продукции сельскохозяйственного производства и, следовательно, на здоровье человека уже давно стоит на повестке дня [1]. Превышение допустимых уровней токсичных веществ в продовольственном зерне является неотъемлемой частью этой проблемы. Методы сохранения качества зерна в изменяющихся климатических условиях могут включать замену одних культур другими с меньшим накоплением токсичных веществ, применение очищенных от тяжелых металлов удобрений, изменение технологий возделывания сельскохозяйственных культур и улучшение управления [2]. Проверка эффективности выбранных методов требует долгосрочных прогнозов качества зерна на основе ограниченного объема данных наблюдений за развитием сельскохозяйственных культур в конкретном регионе. Длительные периоды мониторинга качества зерна, необходимые для составления стандартных прогнозов, значительно замедляют проверку новых методов и становятся непрактичными. Неудивительно, что публикаций на эту тему очень мало.

Большинство существующих прогнозистических моделей, по которым оценивают содержание токсичных веществ в сельскохозяйственных культурах в зависимости от характеристик почв и концентраций токсикантов в почвах [3–8], от орошения сточными водами [9–11], от сортов и технологий возделывания зерновых культур [12], являются регрессионными. До сих пор не существует надежных методов долгосрочного прогнозирования качества зерна и содержания в нем токсикантов при изменяющихся климатических условиях. Это затрудняет разработку и принятие своевременных мер по предотвращению неблагоприятных последствий изменения климата в зернопроизводящих регионах. Попытки оценить влияние повышения температуры и концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере на содержание тяжелых металлов за несколько лет не изменили ситуацию к лучшему [13, 14].

Наше исследование посвящено разработке универсальной интегрированной методологии для прогноза концентраций химических элементов (свинца, кадмия, кобальта, хрома, меди и других) в зерне яровой пшеницы к 2030 г. на примере Алтайского края, одного из крупнейших зернопроизводящих регионов Российской Федерации. В настоящее время производ-

ство зерна пшеницы в России дает пятую часть ее мирового экспорта. В 2017 г. Россия вошла в число ведущих стран по экспорту зерна, впервые обогнав Соединенные Штаты и Канаду. Россия планирует увеличить свой экспорт на 50 % к 2024 г., постепенно захватывая экспорт Евразию, Африку и Латинскую Америку. Ранее лидирующие поставщики пшеницы – фермеры Европы, США и Канады – в максимальной степени используют механизацию и удобрения и ограничены в дальнейшем увеличении производства зерна.

Содержание химических элементов в зерновых зависит от климата и трудно учитываемых местных условий возделывания сельскохозяйственных культур, включая особенности почвы, севооборот, применение химических удобрений и другие факторы. Поэтому мы использовали статистические методы обработки данных, применяемые при долгосрочном прогнозировании малоизученных сложных процессов, оставаясь при этом в рамках системного подхода. Новая методология обработки данных и статистическая имитационная модель, предложенные в данной работе, направлены на решение проблемы долгосрочных прогнозов, основанных на краткосрочных наблюдениях. Именно такие прогностические методы необходимо

димы для проверки новых адаптивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата.

### Материалы и методы

При разработке универсальных прогностических моделей для оценки долгосрочных изменений химических элементов, присутствующих в злаках, необходимо перейти от конкретных единиц измерения анализируемого вещества к безразмерным характеристикам [15]. Измерения концентраций анализируемого вещества в зерне мы проводили методом атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии. Точность данных составила 4–27 % при доверительном уровне 95 % [16]. Мы нормировали данные о концентрации каждого элемента к его среднему значению для десяти муниципальных районов Алтайского края и выразили их в процентах от этого среднего значения (табл. 1). Выбранные районы (1. Кытмановский, 2. Целинный, 3. Павловский, 4. Романовский, 5. Родинский, 6. Ключевской, 7. Алейский, 8. Егорьевский, 9. Третьяковский, 10. Краснощековский) различались по климатическим условиям и входили в группу основных производителей зерна на характеризуемой территории.

**Таблица 1.** Содержание химических элементов в зерне яровой пшеницы (2018–2019 гг.), нормированное на средние значения по территории, %

**Table 1.** Chemical elements content in spring wheat grain (2018–2019) normalized to average values over the territory, %

Химич. элемент Chemical element	Номер района пробы Sampling district number										Среднее, мг/кг Average, mg/kg Dry wt	Допуст. уровень <sup>a</sup> , мг/кг MAC <sup>a</sup> , mg/kg Dry wt
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Pb	34,5	37,53	56,3	133,17	133,17	169,49	127,12	133,17	96,85	78,69	<b>0,17</b>	<b>0,5, 0,2–0,3</b>
Cd	45,05	103,6	108,11	45,05	148,65	144,14	45,05	108,11	117,12	135,14	<b>0,022</b>	<b>0,1, 0,1–0,2</b>
Co	9,17 <sup>c</sup>	9,17 <sup>c</sup>	9,17 <sup>c</sup>	148,62	89,91	104,59	177,98	201,83	161,47	88,07	<b>0,054</b>	0,01
Cr	108,4	83,9	108,4	111,9	118,9	132,9	73,4	118,9	87,4	55,9	<b>2,86</b>	1,0
Cu	106,64	117,13	78,67	111,89	110,14	106,64	104,9	115,38	82,17	66,43	<b>5,72</b>	20
Ni	35,61	83,09	68,25	127,6	130,56	94,96	97,92	225,52	80,12	56,38	<b>0,34</b>	1,0
Zn	125,62	152,71	76,35	113,3	105,91	105,91	91,13	76,35	88,67	64,04	<b>40,6</b>	100
Al	56,95	125,28	63,78	116,17	100,23	125,28	184,51	50,11	111,62	66,06	<b>43,9</b>	–
Ba	150,63	87,87	125,52	83,68	79,50	125,52	58,58	125,52	71,13	92,05	<b>2,39</b>	–
Ca	99,52	102,21	99,52	107,58	10,22	115,65	110,27	102,21	134,48	118,34	<b>3718</b>	–
Fe	116,07	133,93	108,63	84,82	111,61	114,58	92,26	78,87	83,33	75,89	<b>67,2</b>	–
K	109	85,31	87,68	90,05	99,53	113,74	97,16	130,33	99,53	87,68	<b>4,22</b>	–
Mg	107,96	106,13	96,07	100,18	110,7	150,96	90,58	135,41	13,08	88,75	<b>1093</b>	–
Mn	91,06	106,24	80,94	97,81	106,24	111,3	97,81	119,73	96,12	92,75	<b>59,3</b>	–
Mo	40,12	19,55	56,58	95,68	22,63	59,67	339,51	87,45	226,34	52,47	<b>0,98</b>	–
Na	76,82	69,14	57,62	69,14	172,86	179,26	96,03	140,85	69,14	69,14	<b>78,1</b>	–
P	98,67	90,67	88	88	114,67	117,33	117,33	106,67	90,67	3750	–	–
As <sup>b</sup>	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<b>&lt;0,05</b>	<b>0,2, 0,5</b>
Hg <sup>b</sup>	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<b>&lt;0,005</b>	<b>0,03, 0,02</b>

<sup>a</sup> Предельно допустимая концентрация (ПДК) тяжелых металлов в хлебном зерне в соответствии с российскими (жирный шрифт), FAO/ВОЗ или китайскими стандартами [3, 17, 18]. <sup>b</sup> Концентрации мышьяка (As) и ртути (Hg) во всех образцах были ниже предела обнаружения (<ПО), т. е. <0,05 и <0,005 мг/кг соответственно. <sup>c</sup> Концентрация кобальта (Co) в зерне не превышала ПО 0,01 мг/кг. Поэтому мы взяли ½ ПО как среднее значение возможных концентраций Co и выполнили нормировку.

<sup>a</sup> Maximum allowable concentration (MAC) of heavy metals in bread-grain according to the Russian (bold font), FAO/WHO or Chinese standards [3, 17, 18]. <sup>b</sup> Concentrations of arsenic (As) and mercury (Hg) in all samples were less than limit of detection (<LOD), i. e. <0,05 and <0,005 mg/kg, respectively. <sup>c</sup> Grain cobalt (Co) concentration did not exceed LOD of 0,01 mg/kg. Because of this, we took ½ LOD as the average of the possible Co concentrations and normalized it.

Для оценки изменений климата в Алтайском крае и прилегающих территориях мы использовали 11 реперных метеостанций с наблюдениями 1984–2016 гг. [19]. Согласно разработанному методу нормализации и пространственного обобщения метеорологических данных [20, 21], наблюдаемые значения температур воздуха и осадков за каждый месяц каждого года были пересчитаны в проценты относительно их среднемноголетних значений «*in situ*». Ряды среднемесячных температур воздуха теплого сезона были нормированы на среднемноголетнее значение «*in situ*» за июль, тогда как холодного периода – на абсолютное среднемноголетнее значение за январь, а месячные ряды осадков – на среднемноголетнее значение «*in situ*» за июль. Такие нормированные значения позволяют единообразно описывать внутригодовую и многолетнюю динамику температуры и осадков над равнинными и горными районами. Эта динамика однородна для больших регионов, поскольку она формируется мезомасштабными процессами атмосферной циркуляции. Отметим, что предложенное описание метеорологических характеристик позволило разработать высоко адекватные модели агроэкосистем в России и США, а также водного и гидрохимического стоков рек для обширных горных районов [15, 20, 22]. Чтобы вернуться к общепринятым единицам измерения метеорологических факторов (°C, мм), достаточно иметь их среднемноголетние значения за январь и июль для характеризуемого района.

## Результаты

### Прогноз изменений температур воздуха и осадков к 2030 году

В настоящее время с большей или меньшей эффективностью применяется большое количество эмпирически-статистических и детерминированных методов долгосрочных метеорологических прогнозов, а также их различных комбинаций [23, 24]. Первые используют статистические закономерности атмосферных процессов и требуют максимального объема и однородности исследуемых рядов метеорологических данных [21]. Последние основаны на физических законах атмосферных или атмосферно-оceanических процессов и описывают их сложными уравнениями, как, например, в моделях NCEP и WRF-ARW [25, 26].

Системный анализ динамики климата для зернопроизводящей зоны России показывает, что эта динамика подчиняется региональному вековому климатическому циклу, состоящему из трех 33-летних фаз [19, 27, 28]. Эти фазы характеризуются определенными статистическими закономерностями долгосрочных изменений нормированных температуры воздуха и осадков и охватывают 1918–1950, 1951–1983, 1984–2016 гг. Климатические циклы формируются вследствие длительного ритмического влияния растительности и человека на атмосферу. К сожалению, современные климатические модели его не учитывают.

Мы полагаем, что в следующем десятилетии интенсивность антропогенной деятельности, влияющей на климат, вряд ли будет критической. Поэтому мы использовали метеорологические характеристики

третьей климатической фазы как наиболее близкие к прогнозируемому периоду для оценки изменений температуры воздуха и осадков к 2030 г. Мы нормировали и пространственно обобщили (усреднили по 11 реперным метеостанциям) месячные значения этих факторов за 1984–2016 гг., а затем по полученным данным рассчитали многолетние линейные тренды факторов для каждого месяца года. Экстраполируя тренды, мы получили нормированные месячные значения температуры воздуха и осадков на 2030 г. (рис. 1, 2). Эффективность предлагаемого метода построения климатических трендов подтверждается успешными долгосрочными прогнозами температуры воздуха, осадков и урожайности пшеницы в США и России (Сибирский федеральный округ и Алтайский край) [20, 22, 27, 28].

Прогноз свидетельствует о снижении среднемесячной температуры воздуха в январе (~20 %), ее повышении в марте и апреле (>20 %) и стабильной (практически неизменной) температуре в другие месяцы к 2030 г. Прогнозируемые изменения месячных осадков разнонаправлены по месяцам года. Как указывалось выше, прогноз нормализованных климатических характеристик является одинаковым по всему Алтайскому краю, независимо от орографической и климатической неоднородности его территории.

### Взаимосвязь между содержанием химических элементов в зерне пшеницы и климатическими условиями

Долгосрочные изменения температуры воздуха и осадков влияют на гидрохимический сток с ландшафтов [15] и постепенно меняют биогеохимические условия возделывания зерновых культур. Поскольку короткий период наблюдений (2018–2019 гг.) концентраций химических элементов в зерне пшеницы (табл. 1) не позволяет установить для них какую-либо прямую зависимость от климатических факторов, мы сравнили концентрации со среднемноголетними значениями среднемесячной температуры воздуха и месячных осадков, соответствующими каждому из 10 муниципальных районов выборки. Для оценки этих месячных значений мы использовали Интерактивный Агроэкологический атлас России и соседних стран [29]. Для их расчетов была использована ГИС-платформа ArcGIS Desktop 10.0. Затем, используя метод, описанный в разделе «Материалы и методы», мы нормировали температуру воздуха и осадки на их средние для территории Алтайского края значения в январе и июле. Если в предыдущем случае мы получили временную динамику этих факторов (рис. 1, 2), то теперь – пространственные изменения их среднемноголетних значений. Таким образом, исследуемые районы получили свои собственные среднемноголетние нормированные значения климатических факторов. В результате стало возможным связать 10 измеренных концентраций каждого анализируемого вещества (табл. 1) с 10 различными нормированными значениями климатических характеристик для каждого месяца.



Рис. 1. Тренды 1984–2016 гг. регионального векового климатического цикла и прогноз изменений пространственно обобщенной нормированной температуры воздуха до 2030 г. для 12 месяцев года ( $T_i$ ,  $i=1-12$ ) [19]

Fig. 1. Trends (1984–2016) of the regional age-long climatic cycle and forecast of changes in spatially generalized normalized air temperature up to 2030 for 12 months of the year ( $T_i$ ,  $i=1-12$ ) [19]

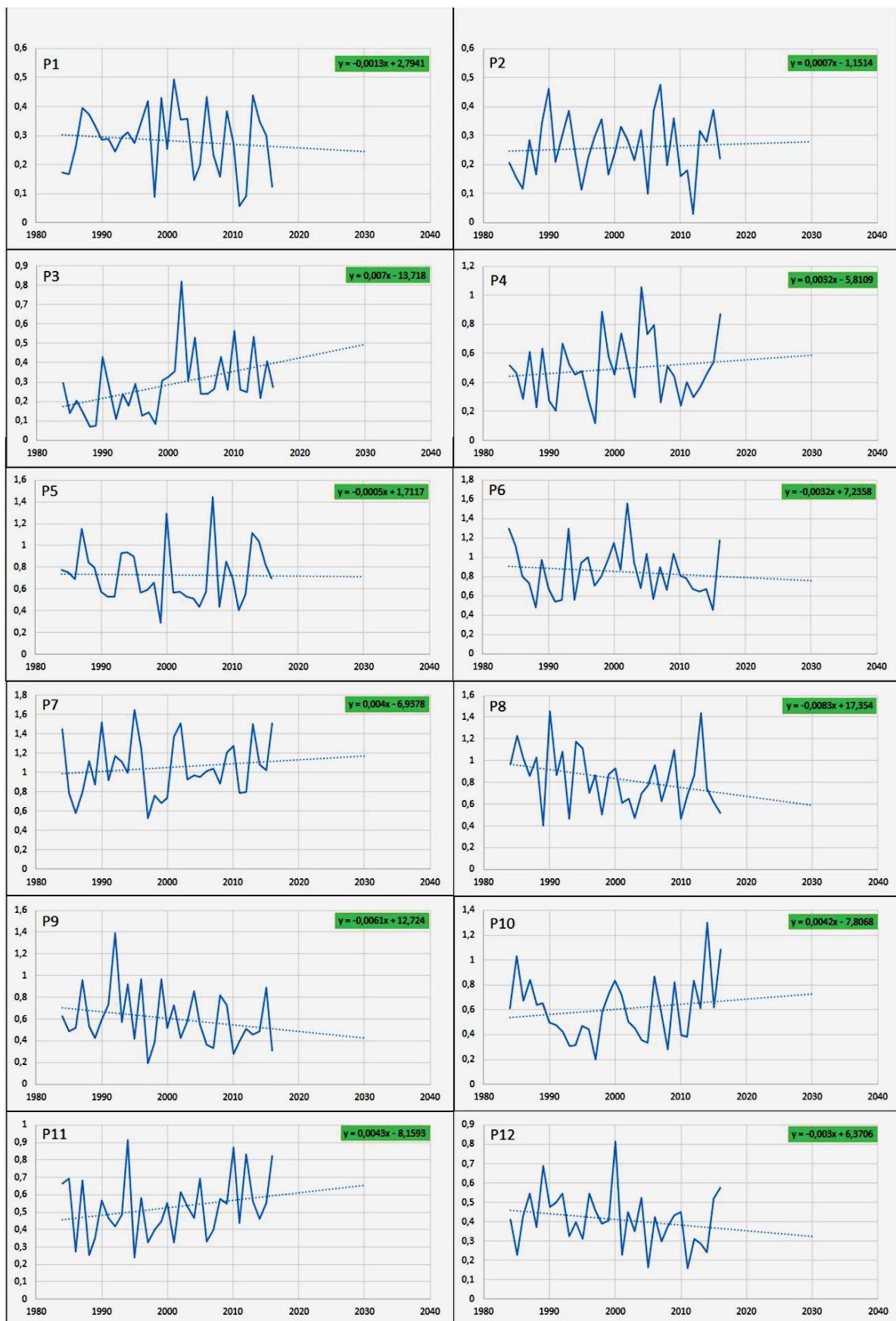


Рис. 2. Тренды 1984–2016 гг. регионального векового климатического цикла и прогноз изменений пространственно обобщенных нормированных осадков до 2030 г. для 12 месяцев года ( $P_i, i=1-12$ ) [19]

Fig. 2. Trends (1984–2016) of the regional age-long climatic cycle and forecast of changes in spatially generalized normalized precipitation up to 2030 for 12 months of the year ( $P_i, i=1-12$ ) [19]

Чтобы наиболее адекватно описать концентрацию анализируемого вещества в зерне пшеницы в зависимости от температуры воздуха и осадков, мы определили отдельное влияние месячных значений этих факторов. С этой целью была найдена корреляция между нормированным содержанием каждого химического элемента и среднемноголетними нормированными значениями среднемесячной температуры воздуха и месячных осадков. Затем мы определили месяцы с наилучшими коэффициентами корреляции. Объединив эти месяцы, мы рассчитали окончательные коэффициенты корреляции между концентрацией анализируемого вещества и климатическими факторами (табл. 2). В табл. 2 наибольшие коэффициенты корреляции выделены жирным шрифтом. Большинство химических элементов оказались нечувствительными к изменениям температуры и осадков, что в целом согласуется с результатами других исследований (например, [30]). Для элементов, чувствительных

к климатическим условиям, увеличение количества осадков ( $P_5, P_6, P_7, P_8$ ) приводит к снижению их концентрации в зерне, в отличие от влияния температуры воздуха ( $T_5, T_6, T_7, T_8$ ) за период роста. Оказалось, что содержание Cu и Cr отрицательно коррелирует не только с осадками, но и с температурой воздуха в зимний период. Вероятно, это связано с климатом Алтайского края, характеризующимся долгой холодной зимой и коротким теплым летом. В муниципальных районах с более теплыми зимами сезон роста пшеницы длится дольше и урожайность намного выше. При относительно равных количествах соединений Cu и Cr, поглощаемых пшеницей из почвы в период налива зерна, концентрация Cu и Cr в урожае, очевидно, будет уменьшаться с увеличением урожайности. Аналогичное объяснение справедливо и для осадков, что согласуется с отсутствием корреляции между концентрациями Cu в зерне пшеницы и почве [30].

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между нормированным содержанием анализируемого вещества в зерне яровой пшеницы (табл. 1) и среднемноголетними нормированными месячными значениями температуры воздуха ( $T_i, i=1-12$ ) и осадков ( $P_i, i=1-12$ )

**Table 2.** Correlation coefficients between the normalized analyte content in spring wheat grain (Table 1) and the long-term average normalized monthly values of air temperature ( $T_i, i=1-12$ ) and precipitation ( $P_i, i=1-12$ )

Химический элемент Chemical element	$(T_5+T_6+T_7+T_8)/4$	$(T_{12}+T_1+T_2+T_3)/4$	$(P_1+P_2+\dots+P_{12})/12$	$(P_5+P_6+P_7)/3$	$(P_7+P_8)/2$
Pb	<b>0,82</b>	-0,32	<b>-0,77</b>	-0,65	<b>-0,74</b>
Cd	0,18	0,25	-0,15	-0,07	-0,16
Co	0,41	0,06	-0,28	-0,22	-0,36
Cr	0,69	<b>-0,76</b>	<b>-0,83</b>	<b>-0,86</b>	<b>-0,84</b>
Cu	0,48	<b>-0,80</b>	-0,62	<b>-0,72</b>	<b>-0,71</b>
Ni	0,60	-0,42	-0,56	-0,62	-0,70
Zn	-0,09	-0,46	-0,13	-0,21	-0,18
Al	0,28	-0,10	-0,19	-0,14	-0,18
Ba	0,09	-0,25	-0,13	-0,18	-0,13
Ca	-0,26	0,53	0,47	0,49	0,39
Fe	0,05	-0,43	-0,17	-0,25	-0,17
K	0,50	-0,25	-0,46	-0,47	-0,59
Mg	0,64	-0,68	-0,67	-0,67	-0,61
Mn	0,56	-0,34	-0,56	-0,57	-0,72
Mo	0,06	0,29	0,16	0,19	0,11
Na	<b>0,78</b>	-0,45	<b>-0,81</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,82</b>
P	0,45	0,06	-0,22	-0,19	-0,36
Ожидаемые изменения $T_i, P_i$ к 2030 г., % Expected changes in $T_i, P_i$ by 2030, %	108,0	90,3 <sup>a</sup>	104,4	105,0	101,5

<sup>a</sup> Модуль зимних температур <100 % означает более теплые зимы/Winter temperature modulus <100 % means warmer winters.

Pb, Cr, Cu и Na в наибольшей степени зависят от климатических условий (табл. 2, выделены жирным шрифтом). Нами установлены линейные регрессии их содержания в зерне пшеницы от среднемноголетних нормированных значений температуры воздуха и осадков для Алтайского края. Возведя в квадрат коэффициенты корреляции из табл. 2, мы также рассчитали надежность аппроксимации  $R^2$  (коэффициент детерминации) для этих регрессий. Значения  $R^2$  для выбранных металлов изменяются в пределах 0,51...0,74. Для уровня значимости 5 % наименьшее из полученных значений критерия Стьюдента  $t_{\text{расч}}$  составило 2,88 при  $t_{\text{табл}}(10-2; 0,025)=2,31$ . Превышение

$t_{\text{расч}}$  над  $t_{\text{табл}}$  свидетельствует о достаточно высокой надежности полученной аппроксимации.

Характеристики почвы с другими сельскохозяйственными факторами влияют на разброс данных относительно линий регрессии и должны значительно снижать коэффициент детерминации  $R^2$ . В то же время характер почв в агрокосистемах не может существенно изменяться за десятилетие. Учитывая это и нормализацию метеорологических факторов *«in situ»*, мы можем использовать установленные зависимости для прогноза изменений концентраций химических элементов в зерне пшеницы к 2030 г. При этом давление ожидаемых изменений к наблюдаемым кон-

центрациям позволяет избежать ошибок прогноза, вносимых характеристиками почвы.

Прогнозирование содержания химических элементов в зерне пшеницы к 2030 году

Для прогноза содержания химических элементов в урожае зерновых использовано следующее линейное имитационное уравнение:

$$FC = CC + k \times (MV30 - MV),$$

где  $FC$  – прогнозируемое содержание анализируемого вещества ( $Pb$ ,  $Cr$ ,  $Cu$ ,  $Na$ ) в зерне пшеницы к 2030 г.;  $CC$  – текущее значение содержания (2018–2019);  $k$  – коэффициент наклона линейной регрессии для содержания анализируемого вещества в зависимости от климатических условий;  $MV$  – среднемноголетние месячные значения осадков или температуры воздуха «*in situ*»:  $[P_1+P_2+\dots+P_{12}]/12$ ,  $[P_5+P_6+P_7]/3$ ,  $[P_7+P_8]/2$ ,  $[T_5+T_6+T_7+T_8]/4$ ,  $[T_{12}+T_1+T_2+T_3]/4$  (табл. 2);  $MV30$  – аналогичные значения осадков или температуры воздуха, но прогнозируемые на 2030 г. Прогнозное урав-

нение характеризует увеличение или уменьшение содержания химических элементов в зерне в зависимости от изменения ( $MV30 - MV$ ) у климатических характеристик.

Ожидаемые к 2030 г. концентрации  $Pb$ ,  $Cu$  и  $Na$  в зерне пшеницы указывают на то, что в период вегетации влияние температуры воздуха намного выше, чем влияние осадков. Это объясняется небольшими градиентами линий регрессии их содержания по отношению к осадкам, а также разнонаправленными изменениями последних (рис. 2). Это также подтверждается множественными регрессиями для  $Pb$ ,  $Cu$  и  $Na$  в зависимости от температуры и осадков. Напротив,  $Cr$  демонстрирует сопоставимое влияние обоих климатических факторов. Рис. 3 демонстрирует наиболее значительные (ожидаемые к 2030 г.) изменения концентраций  $Pb$ ,  $Na$ ,  $Cu$  и  $Cr$  в зерне. Содержание  $Pb$  и  $Na$  заметно увеличивается, в то время как содержание  $Cu$  и  $Cr$  уменьшается.

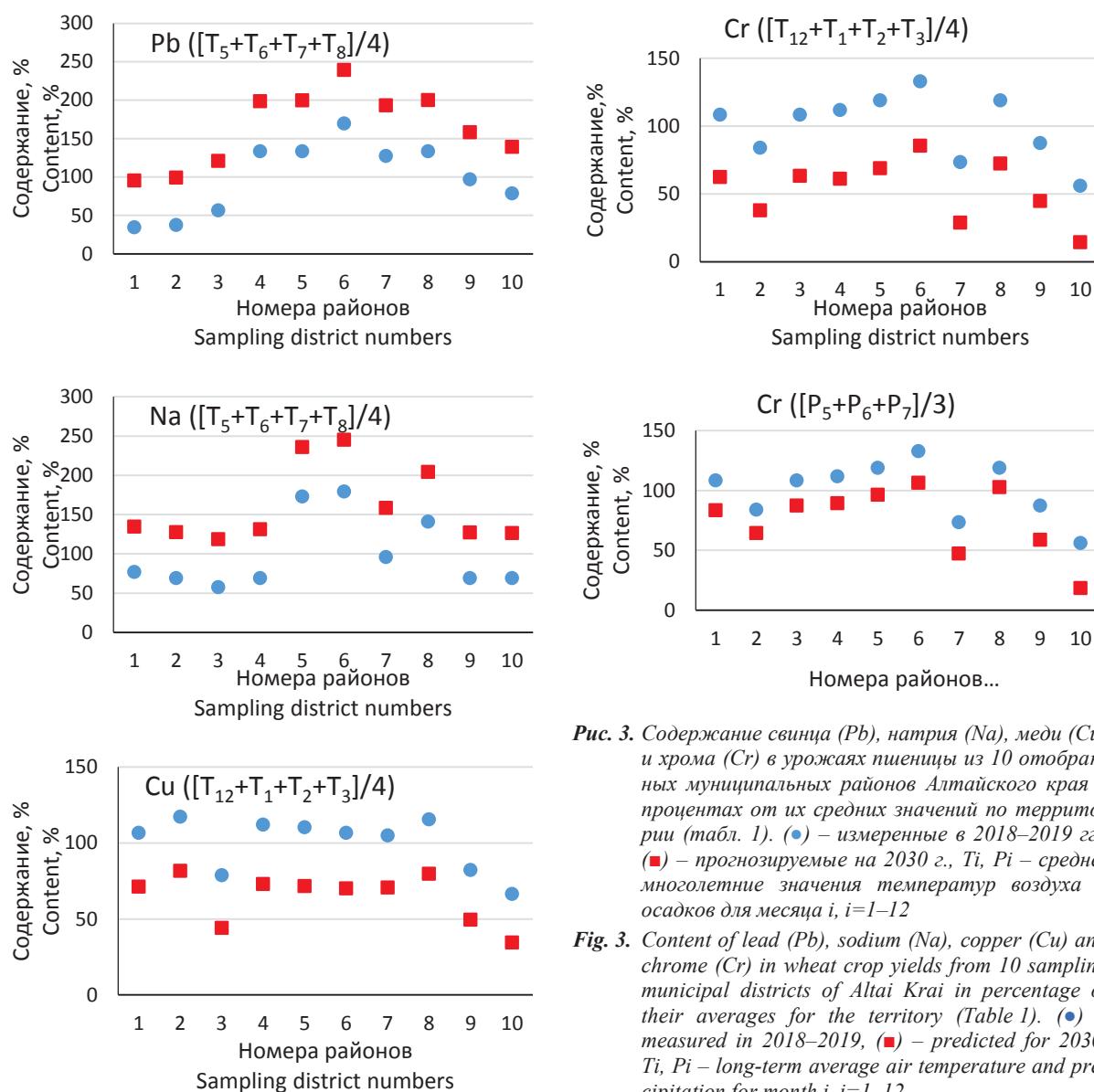


Рис. 3. Содержание свинца ( $Pb$ ), натрия ( $Na$ ), меди ( $Cu$ ) и хрома ( $Cr$ ) в урожаях пшеницы из 10 отобранных муниципальных районов Алтайского края в процентах от их средних значений по территории (табл. 1). (●) – измеренные в 2018–2019 гг., (■) – прогнозируемые на 2030 г.,  $T_i$ ,  $P_i$  – среднемноголетние значения температур воздуха и осадков для месяца  $i$ ,  $i=1-12$

Fig. 3. Content of lead ( $Pb$ ), sodium ( $Na$ ), copper ( $Cu$ ) and chrome ( $Cr$ ) in wheat crop yields from 10 sampling municipal districts of Altai Krai in percentage of their averages for the territory (Table I). (●) – measured in 2018–2019, (■) – predicted for 2030,  $T_i$ ,  $P_i$  – long-term average air temperature and precipitation for month  $i$ ,  $i=1-12$

## Обсуждение

Прогноз (рис. 3) позволяет оценить критические изменения содержания химических элементов в урожаях пшеницы к 2030 г. Во-первых, рассмотрим зависимость Pb от температуры воздуха  $[T_5+T_6+T_7+T_8]/4$  в течение вегетационного периода с мая по август. Эта зависимость указывает на значительное увеличение содержания Pb – до 200–250 % в 4-м, 5-м, 6-м, 7-м и 8-м районах Алтайского края к 2030 г. Как указывалось выше, влияние осадков незначительно, и этот прогноз остается неизменным. Перевод процентов в единицы измерения анализируемого вещества мг/кг (табл. 1) показывает, что к 2030 г. концентрации Pb в зерне, например, в 6-м округе достигнут:

(Среднее содержание Pb)  $\times 250/100 = 0,1652 \times 2,5 = 0,41$  мг/кг.

Полученное значение критически близко к ПДК для Pb в продовольственной пшенице, т. е. 0,5 мг/кг (табл. 1). После 2030 г. содержание Pb в некоторых партиях зерна, доставляемых на зернохранилища, превысит 0,5 мг/кг из-за его статистических колебаний, вызванных факторами окружающей среды. Отметим, что Pb является одним из приоритетных пищевых токсикантов.

К 2030 г. содержание Na в зерне будет расти, тогда как Cu – падать (рис. 3, Na, Cu). Для Na, Cu и Pb влияние температуры значительно превышает влияние осадков. Поэтому их прогноз адекватно отражает последствия изменения климата. ПДК для Na отсутствует, поэтому увеличение его концентрации не влияет на качество зерна. ПДК для Cu значительно превышает его текущее и ожидаемое содержание (табл. 1, рис. 3, Cu), следовательно, по Cu качество зерна останется неизменным.

Рассмотрим еще один приоритетный пищевой токсикант, а именно Cr (рис. 3, Cr). Ожидается, что к 2030 г. его содержание в зерне значительно сократится из-за изменений температуры и осадков. Неожиданно оказалось, что построение в Excel множественной линейной регрессии для Cr устраняет влияние обоих факторов. Другими словами, механистически построенная множественная линейная регрессия может потерять надежные однофакторные взаимосвязи при использовании входных данных ограниченного объема. Целесообразно суммировать совокупный эффект температуры и осадков как независимых факторов (рис. 3, Cr), и содержание Cr к 2030 г., вероятно, приблизится к значению его ПДК 1,0 мг/кг. Его ПДК, принятая в Китае [3], намного ниже текущего содержания Cr в зерне (табл. 1), хотя и сопоставима с прогнозируемым. Таким образом, ухудшенное качество зерна пшеницы по содержанию Cr должно улучшиться к 2030 г. и даже стать нормальным для некоторых муниципальных районов Алтайского края.

Ситуация с Co также заслуживает внимания. ПДК для этого токсиканта в пять раз ниже текущего содержания Co в зерне пшеницы (табл. 1). Поскольку содержание Co не связано с климатическими факторами (табл. 2), качество зерна к 2030 г. останется неудовлетворительным. В России ПДК для Cr и Co не введены, и качество зерна считается высоким.

Содержание As и Hg в зерне пшеницы не превышает предела их измерений и намного меньше ПДК для продовольственного зерна (табл. 1). Содержание других химических элементов в зерне вряд ли существенно изменится и не будет препятствовать использованию пшеницы в пищевых целях. Наконец, напомним, что накопление токсикантов в злаках часто зависит от свойств почвы [31], которые достаточно стабильны и в данной работе не рассматриваются.

## Заключение

Предлагаемая комплексная методика прогноза содержания химических элементов в урожаях зерновых культур основана на системном анализе и статистико-имитационном моделировании климатических процессов и процессов возделывания зерновых. Она включает прогнозные тренды температуры воздуха и осадков, а также модель линейной регрессии для химических элементов (Pb, Cr, Cu, Na), содержание которых в зерне пшеницы чувствительно к многолетним изменениям климата. Среднемноголетние значения климатических характеристик, используемые для построения модели вместо ежегодных, существенно повышают адекватность выполняемых прогнозов.

Для прогноза (к 2030 г.) содержания химических элементов в зерне применяются два эффективных метода обработки метеорологических данных. Они различаются по последовательности временного усреднения, пространственного усреднения и нормализации метеорологических данных. Первый включает в себя усреднение «*in situ*» месячных значений температуры воздуха и осадков во времени, нормализацию «*in situ*» этих значений на свои средние и пространственное усреднение полученных данных. В результате формируется пространственно однородная многолетняя динамика нормированных месячных значений метеорологических факторов. Применяя эту динамику и региональный векторный климатический цикл, мы осуществляли долгосрочный прогноз изменений соответствующих факторов.

Второй метод включает в себя измененный порядок обработки данных, т. е. усреднение «*in situ*» месячных значений температуры воздуха и осадков по времени, усреднение полученных данных по пространству и нормализацию «*in situ*» временных средних значений на пространственные средние. В результате мы получаем пространственную динамику нормированных месячных значений климатических факторов для выполнения регрессионного анализа влияния климата на содержание химических элементов в урожаях зерновых культур, собранных в разных районах исследуемой территории.

Концентрации четырех металлов (Pb, Cr, Cu, Na) в зерне пшеницы зависят от климатических изменений. Адекватность линейных регрессий концентраций от климатических факторов подтверждена значимым коэффициентом детерминации  $R^2$ . Разработанная методика обеспечивает адекватное прогнозирование концентраций анализируемых веществ в зерне на 2030 г. Из прогноза следует, что после 2030 г. содержание свинца (Pb), хрома (Cr) и кобальта (Co) в некоторых партиях пшеницы, доставляемых на зернохранилища в Алтайском крае, превысит ПДК для продовольствен-

ного зерна. В России текущие климатические изменения способствуют повышению урожайности пшеницы, но, с другой стороны, оказывают определенное неблагоприятное воздействие на качество зерна.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gomez-Zavaglia A., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems // Food Research International. – 2020. – V. 134. – 109256.
2. Climate change and food security with emphasis on wheat / Eds. M. Ozturk, A. Gul. – London: Academic Press, 2020. – 384 p.
3. Cai K., Song Z. Bioconcentration, potential health risks, and a receptor prediction model of metal(loid)s in a particular agro-ecological area // Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – 1902.
4. Bioavailable arsenic and amorphous iron oxides provide reliable predictions for arsenic transfer in soil-wheat system / P. Chen, H.M. Zhang, B.M. Yao, S.C. Chen, G.X. Sun, Y.G. Zhu // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – V. 383. – 121160.
5. Exploring the spatially varying relationships between cadmium accumulations and the main influential factors in the rice-wheat rotation system in a large-scale area / M. Qu, J. Chen, B. Huang, Y. Zhao // Science of the Total Environment. – 2020. – V. 736. – 139565.
6. Wang Y., Su Y., Lu S. Predicting accumulation of Cd in rice (*Oryza sativa L.*) and soil threshold concentration of Cd for rice safe production // Science of the Total Environment. – 2020. – V. 738. – 139805.
7. Wheat (*Triticum aestivum L.*) grains uptake of lead (Pb), transfer factors and prediction models for various types of soils from China / X. Wu, Q. Cai, Q. Xu, Z. Zhou, J. Shi / Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2020. – V. 206. – 111387.
8. Heavy metal distribution, relationship and prediction in a wheat-rice rotation system / Y. Zhou, Z. Jia, J. Wang, L. Chen, M. Zou, Y. Li, S. Zhou // Geoderma. – 2019. – V. 354. – 113886.
9. Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum L.*) crops / E.M. Eid, S.A. Alrumanian, A.F. El-Bebany, K.F. Fawy, M.A. Taher, A.E.L. Hesham, G.A. El-Shaboury, M.T. Ahmed // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – V. 26 (1). – P. 392–401.
10. Eid E.M., Galal T.M., El-Bebany A.F. Prediction models for monitoring heavy-metal accumulation by wheat (*Triticum aestivum L.*) plants grown in sewage sludge amended soil // International journal of phytoremediation. – 2020. – V. 22 (10). – P. 1000–1008.
11. Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum L.*) system / S. Rezapour, B. Atashpaz, S.S. Moghaddam, I.K. Kalavrouziotis, C.A. Damalas // Chemosphere. – 2019. – V. 231. – P. 579–587.
12. Efficient models for predicting durum wheat grain Cd conformity using soil variables and cultivars / C. Nguyen, A. Roucou, G. Grignon, J.Y. Cornu, B. Méléard // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – V. 401. – 123131.
13. Effects of elevated carbon dioxide on metal transport in soil-crop system: results from a field rice and wheat experiment / X.S. Luo, D. Zhang, Z. Hu, C. Liu, Z. Zhao, W. Sun, X. Fang, P. Fan // Journal of Soils and Sediments. – 2019. – V. 19 (11). – P. 3742–3748.
14. Responses of wheat and rice grain mineral quality to elevated carbon dioxide and canopy warming / J. Wang, L. Li, S.K. Lam, X. Liu, G. Pan // Field Crops Research. – 2020. – V. 249. – 107753.
15. Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for describing landscape hydrochemical discharge in mountain countries // Landscape Modelling and Decision Support.
16. Химические и спектральные методы. Методика НСАМ № 155-ХС. – М.: ФНМЦ «ВИМС», 2015. – 53 с.
17. Emurotu J.E., Onianwa P.C. Bioaccumulation of heavy metals in soil and selected food crops cultivated in Kogi State, north central Nigeria // Environmental systems research. – 2017. – V. 6. – 21.
18. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. – М.: Проспект, 2021. – 512 с.
19. Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V., Puzanov A.V. The forecast of climate changes in altai-sayan mountain country till 2030 // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – V. 2534. – P. 114–117.
20. Kirsta Y.B. System-analytical modelling. Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. // Ecological Modelling. – 2006. – V. 191. – P. 331–345.
21. Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V. Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas // SN Applied Sciences. – 2020. – V. 2. – 1044.
22. Кирста Ю.Б., Кирста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. – Барнаул: Изд-во АГУ, 2014. – 283 с.
23. Parton K.A., Crean J., Hayman P. The value of seasonal climate forecasts for Australian agriculture // Agricultural Systems. – 2019. – V. 174. – P. 1–10.
24. Detecting improvements in forecast correlation skill: Statistical testing and power analysis / S. Siegert, O. Bellprat, M. Menegoz, D.B. Stephenson, F.J. Doblas-Reyes // Monthly Weather Review. – 2017. – V. 145 (2). – P. 437–450.
25. Сравнение прогнозов по региональной модели атмосферы при различных начальных и граничных условиях / Р.Ю. Игнатов, М.Ю. Зайченко, М.А. Толстых, К.Г. Рубинштейн, М.М. Курбатова // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 6. – С. 17–23.
26. The NCEP climate forecast system Version 2 / S. Saha, S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, et al. // Journal of Climate. – 2014. – V. 27. – P. 2185–2208.
27. Кирста Ю.Б. Прогноз климата и агроклиматического потенциала Сибирского федерального округа до 2020 года // Проблемы региональной экологии. – 2011. – № 3. – С. 22–30.
28. Кирста Ю.Б., Курепина Н.Ю., Ловцкая О.В. Прогноз климата и агроклиматического потенциала Алтайского края до 2020 года // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1. – С. 27–32.
29. Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения / под ред. А.Н. Афонин, С.Л. Грин, Н.И. Дзюбенко, А.Н. Фролов. 2008. URL: <http://www.agroatlas.ru> (дата обращения 11.02.2022).
30. Grain zinc, iron, and copper concentrations of wheat grown in Central Iran and their relationships with soil and climate variables / M. Karami, M. Afyuni, A.H. Khoshgoftarmash, A. Papritz, R. Schulin // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2009. – V. 57 (22). – P. 10876–10882.
31. Heavy metal contents, distribution, and prediction in a regional soil-wheat system / J. Ran, D. Wang, C. Wang, G. Zhang, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2016. – V. 544. – P. 422–431.

Работа выполнена с использованием научных результатов гранта 22-27-00058 Российского научного фонда (анализ метеорологических данных – Юрием Богдановичем Кирстой).

#### Информация об авторах

**Кирста Ю.Б.**, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН.

**Пузанов А.В.**, доктор биологических наук, профессор, и.о. директора Института водных и экологических проблем СО РАН.

**Рождественская Т.А.**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН.

Поступила 15.06.2022 г.

UDC 51-7:633.11:57.014

## SIMPLE METHODOLOGY FOR LONG-TERM PREDICTION OF GRAIN QUALITY

**Yuri B. Kirsta<sup>1</sup>,**  
kirsta@iwep.ru

**Alexander V. Puzanov<sup>1</sup>,**  
puzanov@iwep.ru

**Tamara A. Rozhdestvenskaya<sup>1</sup>,**  
rtamara@iwep.ru

<sup>1</sup> Institute for Water and Environmental Problems SB RAS,  
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

**The main aim:** to develop the universal integrated methodology and statistical-simulation model for long-term forecasting the content of toxic chemical elements in grain crop yields.

**Objects.** The study was based on the system approach and carried out by the example of wheat cultivated in Altai Krai – one of the main grain-producing regions of Russia. Wheat crops were sampled in 10 municipal districts with different climatic conditions. A total of 19 chemical elements (Pb, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn, Al, As, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, P) content was studied. It is shown that concentrations of Pb (lead), Cr (chrome), Cu (copper) and Na (sodium) in wheat grain depend on climatic characteristics of the cultivation area.

**Methods.** Regression dependences of the element content on the long-term average values of monthly air temperature and precipitation were established. Based on a regional age-long climatic cycle, normalization and spatial generalization of air temperature and precipitation providing the uniform dynamics of their relative monthly values (in percent) throughout the study region, a forecast of their changes by 2030 was made.

**Results.** A procedure for grain sampling, GIS technologies for processing meteorological and cartographic data, methods for predicting climate changes and establishment of quantitative relationships of chemical elements content in grain with climatic characteristics – all together make up the methodology that allows developing the predictive model for toxic substance present in wheat. The model was used for estimation of Pb, Cr, Cu and Na changes in wheat grain by 2030. The content of other elements in wheat weakly correlate with long-term changes in air temperature and precipitation; therefore, it can hardly change significantly. After 2030, concentrations of Pb, Co (cobalt) and Cr in wheat delivered to elevators from some municipal districts will exceed their maximum allowable levels for bread-grain.

**Key words:**

Wheat grain, heavy metals, forecast, climate, Russia.

The research was carried out using the scientific results of grant 22-27-00058 of the Russian Science Foundation (analysis of meteorological data – by Yury B. Kirsta).

### REFERENCES

1. Gomez-Zavaglia A., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems. *Food Research International*, 2020, vol. 134, 109256.
2. Climate change and food security with emphasis on wheat [Climate change and food security with emphasis on wheat]. Eds. M. Ozturk, A. Gul. London, Academic Press, 2020. 384 p.
3. Cai K., Song Z. Bioconcentration, potential health risks, and a receptor prediction model of metal(loid)s in a particular agro-ecological area. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, 1902.
4. Chen P., Zhang H.M., Yao B.M., Chen S.C., Sun G.X., Zhu Y.G. Bioavailable arsenic and amorphous iron oxides provide reliable predictions for arsenic transfer in soil-wheat system. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 383, 121160.
5. Qu M., Chen J., Huang B., Zhao Y. Exploring the spatially varying relationships between cadmium accumulations and the main influential factors in the rice-wheat rotation system in a large-scale area. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 736, 139565.
6. Wang Y., Su Y., Lu S. Predicting accumulation of Cd in rice (*Oryza sativa* L.) and soil threshold concentration of Cd for rice safe production. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 738, 139805.
7. Wu X., Cai Q., Xu Q., Zhou Z., Shi J. Wheat (*Triticum aestivum* L.) grains uptake of lead (Pb), transfer factors and prediction models for various types of soils from China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 206, 111387.
8. Zhou Y., Jia Z., Wang J., Chen L., Zou M., Li Y., Zhou S. Heavy metal distribution, relationship and prediction in a wheat-rice rotation system. *Geoderma*, 2019, vol. 354, 113886.
9. Eid E.M., Alrumanan S.A., El-Bebany A.F., Fawy K.F., Taher M.A., Hesham A.E.L., El-Shaboury G.A., Ahmed M.T. Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum* L.) crops. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26 (1), pp. 392–401.
10. Eid E.M., Galal T.M., El-Bebany A.F. Prediction models for monitoring heavy-metal accumulation by wheat (*Triticum aestivum* L.) plants grown in sewage sludge amended soil. *International journal of phytoremediation*, 2020, vol. 22 (10), pp. 1000–1008.
11. Rezapour S., Atashpaz B., Moghaddam S.S., Kalavrouziotis I.K., Damalas C.A. Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system. *Chemosphere*, 2019, vol. 231, pp. 579–587.
12. Nguyen C., Roucou A., Grignon G., Cornu J.Y., Méléard B. Efficient models for predicting durum wheat grain Cd conformity using soil variables and cultivars. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 401, 123131.
13. Luo X.S., Zhang D., Hu Z., Liu C., Zhao Z., Sun W., Fang X., Fan P. Effects of elevated carbon dioxide on metal transport in soil-crop system: results from a field rice and wheat experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, vol. 19 (11), pp. 3742–3748.
14. Wang J., Li L., Lam S.K., Liu X., Pan G. Responses of wheat and rice grain mineral quality to elevated carbon dioxide and canopy warming. *Field Crops Research*, 2020, vol. 249, 107753.
15. Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for describing landscape hydrochemical discharge in mountain countries. *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*. Cham, Springer, 2020. pp. 163–178.

16. *Khimicheskie i spektralnye metody. Metodika NSAM № 155-HS* [Chemical and spectral methods. Methodology NSAM no. 155-HS]. Moscow, FNMC «VIMS» Publ., 2015. 53 p.
17. Emurotu J.E., Onianwa P.C. Bioaccumulation of heavy metals in soil and selected food crops cultivated in Kogi State, north central Nigeria. *Environmental systems research*, 2017, vol. 6, 21.
18. SanPiN 2.3.2.1078-01. *Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov* [State Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations 2.3.2.1078-01. Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products]. Moscow, Prospekt Publ., 2021. 512 p.
19. Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V., Puzanov A.V. The Forecast of Climate Changes in Altai-Sayan Mountain Country till 2030. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2534, pp. 114–117.
20. Kirsta Y.B. System-analytical modelling. Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. *Ecological Modelling*, 2006, vol. 191, pp. 331–345.
21. Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V. Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, 1044.
22. Kirsta Yu.B., Kirsta B.Yu. *Informatsionno-fizicheskiy zakon postroeniya evolyutsionnykh sistem. Sistemno-analiticheskoe modelirovaniye ekosistem* [Information-physical law of construction of evolutionary systems. System-analytical modeling of ecosystems]. Barnaul, AGU Publ., 2014. 283 p.
23. Parton K.A., Crean J., Hayman P. The value of seasonal climate forecasts for Australian agriculture. *Agricultural Systems*, 2019, vol. 174, pp. 1–10.
24. Siegert S., Bellprat O., Menegoz M., Stephenson D.B., Doblas-Reyes F.J. Detecting improvements in forecast correlation skill: statistical testing and power analysis. *Monthly Weather Review*, 2017, vol. 145 (2), pp. 437–450.
25. Ignatov, R.Y., Zaichenko, M.Y., Tolstykh, M.A. Comparison of regional atmospheric model forecasts under different initial and boundary conditions. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 378–383.
26. Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, pp. 2185–2208.
27. Kirsta Yu.B. The forecast of both climate and agroclimatic potential in Siberian federal okrug till 2020. *Regional Environmental Issues*, 2011, no. 3, pp. 22–30. In Rus.
28. Kirsta Yu.B., Kurepina N.Yu., Lovtskaya O.V. Forecast of climate and agroclimatic potential of the Altai region up to 2020. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2013, no. 1, pp. 27–32. In Rus.
29. *Agroekologicheskiy atlas Rossii i sopredelnykh stran: ekonomicheski znachimye rasteniya, ikh vrediteli, bolezni i sornye rasteniya* [Agro-ecological atlas of Russia and neighboring countries: economically significant plants, their pests, diseases and weeds]. 2008. Available at: <http://www.agroatlas.ru> (accessed 11 February 2022).
30. Karami M., Afyuni M., Khoshgoftaranesh A.H., Papritz A., Schulin R. Grain zinc, iron, and copper concentrations of wheat grown in Central Iran and their relationships with soil and climate variables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, vol. 57 (22), pp. 10876–10882.
31. Ran J., Wang D., Wang C., Zhang G., Zhang H. Heavy metal contents, distribution, and prediction in a regional soil–wheat system. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 544, pp. 422–431.

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

**Yuri B. Kirsta**, Dr. Sc., professor, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

**Alexander V. Puzanov**, Dr. Sc., professor, director, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

**Tamara A. Rozhdestvenskaya**, Cand. Sc., senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

УДК 532.528

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

**Радзюк Александр Юрьевич<sup>1</sup>,**  
aradzyuk@sfu-kras.ru

**Истягина Елена Борисовна<sup>1</sup>,**  
eistyagina@sfu-kras.ru

**Кулагина Людмила Владимировна<sup>1</sup>,**  
klvation@gmail.com

**Жуйков Андрей Владимирович<sup>1</sup>,**  
azhukov@sfu-kras.ru

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660036, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

**Актуальность.** Известны примеры получения гомогенных жидкостей на основе углей, нефтепродуктов, асбеста, цемента и др. георесурсов с использованием эффектов гидродинамической кавитации. Эффективность кавитационной обработки многофазных сред зависит от множества факторов, таких как тип кавитации (акустическая и гидродинамическая), состав обрабатываемой среды, режим течения, температура, давление, вязкость и многие другие. Разнообразие путей применения кавитационных технологий не позволяет выработать единые подходы к оценке их эффективности, в этой связи актуальность приобретает их сравнение на основе индивидуальных для каждого технологического процесса критерии.

**Цель:** на основе анализа и обобщения данных о современном состоянии использования кавитационных технологий в тепло-энергетике, химической и нефтяной отраслях производства, атомной энергетике и др. сделать выводы о том, какие из используемых способов кавитационной обработки обладают наибольшей эффективностью в изменении технологических параметров обрабатываемых сред.

**Объекты:** технологии, устройства и аппараты, в которых при диспергировании, эмульгировании, гомогенизации, очистке и т. д. имеются режимы течения обрабатываемых сред, сопровождающиеся кавитационными явлениями.

**Методы:** анализ информации о применении кавитационных технологий, приведенной в публикациях за последние пять лет в журналах, проиндексированных в международных базах Web of Science и Scopus.

**Результаты.** Изложен анализ литературных источников в области использования кавитационных технологий. Приведены основные результаты работ по кавитационной обработке различных жидких композиций, полученные авторами статей. Рассмотрены механизмы кавитационного воздействия, применение кавитационных технологий в различных отраслях, актуальные методы и средства изучения кавитационных явлений. Сделаны выводы об основных достоинствах и недостатках применения кавитационной технологии как элемента технологической обработки. Показано, что наиболее эффективным является воздействие на обрабатываемые среды гидродинамической кавитацией.

### Ключевые слова:

Кавитация, интенсификация обработки, смесительные устройства, диспергирование, эмульгирование, гомогенизация.

### Введение

Одним из эффективных методов интенсификации многих химико-технологических процессов в жидкостях является кавитационное воздействие на обрабатываемую среду. В основе кавитационной технологии лежит явление кавитации, которая искусственно создается в специальных технологических реакторах. Различают гидродинамическую и акустическую кавитацию. Акустическая кавитация возникает при прохождении через жидкость акустических колебаний, гидродинамическая – за счет местного понижения давления в потоке жидкости при обтекании твердого тела.

Принцип действия гидродинамических кавитационных аппаратов основывается на снижении давления в потоке жидкости до давления насыщенного пара за счет помещения в устройство кавитатора той или иной конструкции (например, решетка, конус и др.), обеспечивающего локальное увеличение скорости и,

как следствие, падение давления. Образующиеся в потоке парогазовые пузырьки при дальнейшем разгоне потока объединяются в каверну. Соотношение содержания газа и пара в каверне может быть различным (теоретически от нуля до единицы). В зависимости от концентрации пара или газа в полости их называют паровыми или газовыми. При попадании в область повышенных давлений каверна схлопывается, а выделяющейся в этом процессе энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной каверны.

### Механизмы кавитационного воздействия

В последние годы процесс кавитационного воздействия стал широко использоваться для интенсификации многих промышленных производств. Только за последние пять лет в отечественной и зарубежной литературе можно встретить большое число научных публикаций, посвященных применению кавитацион-

ных технологий в различных областях промышленности. В химической промышленности кавитационные реакторы при производстве биодизеля обеспечивают более высокую скорость реакции по сравнению с обычными реакторами, поскольку значительно сокращается время, необходимое для смешивания и диффузии молекул реагентов, и, следовательно, устраняется потребность в высокой энергии для перемешивания [1]. Микропузырьки воздуха, полученные методом гидравлической кавитации с использованием сопла Вентури, рассматриваются в качестве топливной присадки в двигателях внутреннего сгорания [2]. Преимуществом их использования является простота производства и низкая стоимость.

Смесительные устройства и системы на их основе часто используются во многих отраслях промышленности для таких технологических операций, как смешивание, диспергирование, процессы тепло- и массообмена. Основным направлением совершенствования таких устройств является повышение степени диспергирования эмульсий и супензий. Одним из наиболее перспективных способов улучшения условий работы смесителей и повышения степени диспергирования смеси является использование гидродинамической кавитации. В работе [3] рассматривалась теория кавитационных явлений высокоскоростных струй и разработка эффективного гидродинамического смесителя с минимальным энергопотреблением.

#### Применение кавитационных технологий в различных отраслях

Производство биодизеля из микроводорослей является одним из решений энергетической проблемы будущего [4]. Одним из механических методов разрушения клеток с наименьшими затратами энергии является гидродинамическая кавитация. В данной работе сравнивается эффективность липидной экстракции микроводорослей с помощью гидродинамической кавитации и обычной экстракции. Результаты показали значительное преимущество гидродинамической кавитационной технологии по сравнению с традиционной.

Широко используются кавитационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Так, в работе [5] исследуется влияние древесного угля после кавитации на химические и биохимические свойства почвы. Результаты показали значительное снижение содержания тяжелых металлов в биомассе при использовании кавитированного древесного угля. Установлено, что за счет эффектов пароконденсационной кавитации происходят структурные превращения макромолекулярных соединений диффузионного сока и коллоидных дисперсионных веществ, что приводит к увеличению электропроводности жидкости за счет дезагрегации веществ коллоидной дисперсии и высвобождения компонентов ионных носителей [6]. Этот эффект используется в свеклообрабатывающей промышленности для повышения чистоты конечного продукта и увеличения его объема производства. В работе [7] представлен механизм оптимизации результатов исследований комплексной системы пере-

работки отходов свекловичного производства сахара с использованием кавитационных гидродинамических генераторов. В результате исследований подтвержден синергетический эффект при использовании кавитатора совместно с другими методами воздействия. Процессы экстракции посредством гидродинамической кавитации отработанной кожуры лимона в воде на предприятиях по переработке лимонного сока рассматриваются в работе [8]. Возможность использования замкнутого цикла, примененного к переработке цитрусовых, позволяет повысить производство пектина и эфирного масла лимона, и водорастворимого красителя.

Получениеnanoэмulsionий эмульгированием жидкости за счет комбинированного воздействия кавитации, сдвига и удара демонстрирует превосходную эффективность эмульгирования при использовании порошка молочной сыворотки для получения стабильных фракций [9]. Роторный кавитатор для обработки суспензий с разрушением клеток микроорганизмов и эмульгированием несмешивающихся смесей представлен в работе [10].

Необходимость разработки и применения эффективных технологий очистки и современного энергосберегающего оборудования, реализующего их, является актуальной задачей для многих нефтегазодобывающих и сервисных организаций. Для этих целей могут быть применены различные установки для гидродинамической кавитационной очистки [11]. Проблемы использования гидродинамической кавитации в нефтегазовой отрасли развиваются в работе [12]. Кавитация интенсифицирует процессы диспергирования, эмульгирования, гомогенизации, очистки отложений и т. д. Авторы обобщили свой опыт разработки научно обоснованных теоретических и технологических решений в проектировании оборудования и технологий использования кавитационно-струйного течения для решения задач нефтегазовой отрасли, предложив многокомпонентные дисперсные среды (буровые и цементные растворы) с использованием кавитации. В статье [13] исследуется технология гидродинамической кавитационной обработки вязкой и высоковязкой нефти и возможность ее применения в трубопроводной транспортной системе с целью улучшения реологических свойств, транспортируемой нефти, в том числе динамических вязкостных напряжений сдвига. Использование ультразвуковой кавитации для снижения вязкости тяжелой нефти приведено в работе [14]. В работе [15] показано, что волновая обработка бурового раствора проточными гидродинамическими вихрегенераторами значительно повышает качество бурового раствора и сокращает время его приготовления.

Генерация нанопузырьков за счет гидродинамической кавитации используется для получения большого объема стабилизированных нанопузырьков для практической флотации путем непрерывной рециркуляции потока через резервуар для насыщения газа или кавитационную трубку при аэрации нефтеносных суспензий в гидротранспортных трубопроводах в работе [16].

Разработке новых методов производства композиционных материалов с использованием гидродинамической кавитации посвящена статья [17]. Авторы исследуют возможность получения композиционного материала на основе эластичного пенополиуретана с углеродными наполнителями с использованием пропитки полиуретаном в неравновесной суспензии сажи. Неравновесную суспензию получали обработкой в гидродинамическом генераторе роторного типа в режиме кавитации.

В работе [18] рассмотрен механизм совместного влияния магнитного поля и гидродинамической кавитации на свойства солевых растворов, используемых для смешивания цементных паст. Гидродинамическая кавитация приводит к образованию активных форм кислорода, нанопузырьков диоксида углерода и инициирует взаимодействие новых форм с примесными катионами металлов, растворенными в воде. Получаемый цементный камень отличается повышенной прочностью и морозостойкостью по сравнению с камнем, полученным традиционным способом.

Влияние кавитационной обработки на реологические свойства щелочно-алюмосиликатного связующего для вспучивающихся покрытий с целью улучшения теплотехнических и механических свойств рассмотрено в работе [19]. Определены временные и физические параметры, при которых ускоряются процессы наноструктурирования.

Кавитационный механизм абляции материала, который обычно имеет место при импульсном лазерном воздействии на твердую мишень, в жидкой среде скавывается на формировании популяции наночастиц металла [20]. Метод получения наночастиц коллоидных сплавов путем импульсной лазерной абляции в жидкостях рассматривается в работе [21]. Расслоение абляционного факела в формирующемся кавитационном пузыре приводит к образованию наночастиц разного размера и состава. В данной работе используются расчетно-экспериментальные исследования механизмов формирования наночастиц в ультракороткой импульсно-лазерной абляции тонких двухслойных пленок Ag/Cu и Cu/Ag. Гидродинамическая обработка может способствовать улучшению технологических свойств древесины. Изменение её физико-механических свойств при изготовлении древесных плит из опилок рассматривается в работе [22].

Надежности работы технологического оборудования повсеместно уделяется большое внимание. Экспериментально-расчетное исследование нестационарного потока в насосе водометных движителей, выполненное с целью предотвращения явления вращающегося срыва и кавитации и улучшения их конструкции и комплексных характеристик, приводится в работе [23]. Исследования кавитационной эрозии сталей, работающих при высоких гидродинамических нагрузках, приведены в работе [24]. Показано, что азотирование поверхности стали приводит к повышению сопротивления эрозии. Влияние кавитации на работу гидростатического привода исследовалось в работе [25]. Эффект кавитации учитывается в численных полуаналитических исследованиях работы

[26] с целью определения характеристик смазки текстирированного подшипника скольжения. Исследование влияния кавитационной модели для анализа устойчивости работы подшипника скольжения приводится в работе [27]. Модель газовой кавитации используется для изучения влияния на напряжение сдвига и механические потери подшипника в работе [28]. Исследованию проточного химического процесса и его засорению при непрерывной химической обработке посвящена работа [29]. Выявлено, что осаждение твердых частиц вызывается гидродинамической кавитацией. Характеристики вращающейся кавитации, которая может вызвать сильную вибрацию, поломку насоса и потерю работы в турбонасосах, численно рассчитываются в работе [30]. В данной статье представлена модель, предназначенная для оценки устойчивости турбонасосов ракетных двигателей в невязких однофазных средах. На энергетических предприятиях создание высокодисперсных водомазутных эмульсий на основе кавитационной обработки является весьма перспективным [31]. В данной работе рассмотрены конструкции оборудования для кавитационной обработки вязких жидкостей на стадии хранения и подготовки к сжиганию на котельных и ТЭЦ. Предпочтение отдается аппаратам статического типа, отличающимся высокой производительностью, надежностью и низкими капитальными и эксплуатационными затратами.

В работе [32] исследовано влияние предварительного окисления вакуумного остатка с помощью технологии гидродинамической кавитации на снижения содержания серы в коксе. Среди новых угольных технологий большой интерес представляет сжигание низкосортного угля в виде водоугольного шламового топлива. В статье [33] представлены результаты влияния предварительной кавитационной обработки воды в составе водоугольного топлива на динамику сгорания топлива и на его экологические характеристики. В режиме суперкавитации использовался гидродинамический осциллятор роторного типа. Показано, что технология кавитационной обработки воды приводит к изменению динамики горения водоугольного топлива и дополнительному снижению содержания  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$ . В статье [34] рассматривается кавитационная обработка водоугольных шламов, увеличивающая степень дисперсности угля, и, следовательно, его более эффективное сжигание.

Вопросу повышения качества готового продукта из древесной массы, предварительно обработанной в гидродинамическом диспергаторе, посвящена статья [35]. Вследствие повышения водоудерживающей способности досок, изготовленных из такой массы, их прочность увеличивается.

Всё чаще в последнее время встречается информация об использовании экологически чистого биотоплива. Повышение эффективности его применения является актуальной задачей. В работе [36] авторы предлагают использовать в качестве предварительной обработки кавитационные процессы при производстве биотоплива. Изначально измельчаются сущеные листья и стебли кукурузы с раствором перкарбоната

натрия. Эта смесь проходит через гидродинамическую кавитационную систему с системой кругового потока и трубкой Вентури. Образующиеся в процессе кавитации пузырьки схлопываются, разрушая волокна целлюлозы.

Очистка сточных вод от фенола с помощью технологии гидравлической кавитации рассматривается в работе [37]. В качестве кавитационного устройства использовалась комбинация трубы Вентури и различных диафрагм. Было изучено влияние времени работы, давления на входе, расположения отверстий и числа кавитации на скорость разложения фенола. В статье [38] представлены результаты исследований по химической очистке стоков от производства битумов нефтяного происхождения. Было изучено несколько процессов усовершенствованного окисления, включая использование гидроксильных и сульфатных радикалов-окислителей, гидродинамическую кавитацию, а также сонокавитацию. Результаты показали эффективное разложение большинства летучих органических соединений, присутствующих в сточных водах, при использовании этих технологий.

На основе лабораторных исследований и пилотных экспериментов в статье [39] была разработана промышленная система очистки воды, сочетающая озонирование с гидродинамической кавитацией для удаления водорослей, которая может применяться для уменьшения экологического ущерба и экономических потерь, которые могут быть вызваны цветением водорослей и мертвыми водорослями. Описание процесса гидродинамической кавитации, используемого для улучшения флотации минералов и обеззараживания воды, приводится в работе [40], где в качестве гидродинамического кавитационного устройства использовалась трубка Вентури. В работе [41] рассмотрена эффективность системы очистки балластных вод на основе усовершенствованных окислительных процессов сильного разряда электрического поля при атмосферном давлении и технология гидродинамической кавитации. Оценка эффективности озонирования и гидродинамической кавитации при очистке сточных вод является целью исследования в работе [42].

Обессоливание промышленных стоков и опреснение морских вод рассматривается как один из наиболее перспективных путей решения проблем водобезопасности. В этом направлении перспективно использование режимов развитой кавитации, поскольку особенности конструктивного исполнения и принципа действия термокавитационных аппаратов обуславливают некоторые преимущества этого способа обессоливания по сравнению с известными [43]. Следовательно, проведение исследований по созданию новых суперкавитационных аппаратов с целью интенсификации процессов обессоливания жидкостей является частью общей актуальной задачи водообеспечения промышленности и создания замкнутых систем водоснабжения [44]. За последние годы появился ряд публикаций технологических решений, направленных на экономию затрат на ресурсы, повышение производительности и увеличение срока службы опреснительных установок, экологичность их работы.

Ротационный суперкавитационный испаритель был предложен как новая технология для опреснения морской воды [45, 46]. На базе численного моделирования суперкавитационных потоков в испарителе проводится анализ эффективности работы суперкавитатора при различных температурах и скоростях вращения. Исследование влияния на пространственно-временную эволюцию вращательной естественной кавитации, гидродинамические характеристики кавитирующих потоков в ротационном испарителе при различных скоростях вращения с помощью экспериментов по визуализации и трехмерного стационарного численного моделирования было продолжено в работе [44]. Метод термического опреснения морской воды на основе суперкавитации предлагается в работе [47]. Проводится изучение влияния отбора пара на гидродинамические характеристики и производительность опреснения, а также определение диапазонов и давления экстракции, подходящих для работы испарителя на основе трехмерного численного моделирования суперкавитационных потоков при различных скоростях вращения и давлениях экстракции.

#### Методы и средства изучения кавитационных явлений

Широкое применение кавитационных разработок сопровождается их аналитическим и экспериментальным изучением. Для повышения надежности работы технологического оборудования в ряде работ проводятся исследования гидравлических характеристик на основе моделирования процессов кавитации в зависимости от таких параметров, как числа кавитации [48], где выявлен диапазон безопасной работы в условиях отсутствия кавитации гидродинамических турбин. Изучение развития (эволюции) кавитации численно проводилось в работе [49] для двумерного подводного крыла NASA, используя модель кавитации с переносом массы и модель  $k$ -эпсилон. Результаты теоретических исследований процесса гидродинамического измельчения супензии целлюлозы на основе кавитационных потоков приведены в работе [50], где используется комплексная модель возникновения кавитационного эффекта, основанная на методах математического моделирования.

Использование математических моделей позволяет разработать наиболее оптимальную конструкцию без изготовления прототипов [51]. Моделирование процессов в термочувствительном кавитирующем потоке, возникающем вокруг судна на подводных крыльях, предложено в работах [52, 53]. В работе [54] численными методами выявлены основные закономерности для погружных и непогружных струй, применяемых для разрушения отложений, обладающих высоким сцеплением с поверхностями нефтегазопромыслового оборудования. Численное моделирование течения многофазных потоков выполнялось в программном комплексе для решения задач вычислительной гидродинамики методом конечных элементов. Проведено моделирование течений для трех типов сопел: конического сужения с цилиндрическим выходным отверстием; цилиндрического и конического расходящегося. Полученные результаты подтверждены практическими испытаниями в полевых

условиях. Численному моделированию кавитационного потока посвящены и работы [55–57]. В работе [58] исследуется эффект кавитации в сопле с прямым конусом. Численное моделирование с учетом внутреннего и внешнего полей потока сопла проводилось в режиме объема жидкости с помощью пакета CFD.

Экспериментальные методы являются наиболее очевидными и надежными в исследованиях кавитации. На кавитационные процессы оказывает влияние большое число различных факторов. Количество пузырьков нерастворимого кислорода в движущемся потоке исследовалось в работе [59], где описан экспериментальный стенд с ресорбером для уменьшения количества растворенных газов. Проведено сравнение экспериментальных результатов формирования кавитационных условий до и после установки ресорбера. Опыты проводились с технической водопроводной водой, достоверность результатов подтверждена сравнением их с литературными данными. Развитие кавитации при запуске вверх подводных объектов, приближающихся с большой скоростью к поверхности моря, рассматривается в работе [60]. С помощью моделирования больших вихрей исследуется кавитационный отрыв и схлопывание во время выхода из воды осесимметричного снаряда.

Испытания на эрозию чистого алюминия в зависимости от геометрии сопла рассматриваются в работе [61]. С помощью высокоскоростной видеокамеры проведены измерения напорного давления кавитирующей струи, чтобы понять влияние геометрии форсунки на интенсивность агрессивного воздействия. В работе [62] экспериментально исследуется взаимосвязь между условиями работы, геометрией и диаметром сопла и поведением кавитационной струи с целью определения скорости эрозии в различных условиях. На основе математического анализа полученных результатов предложена новая форма расчета числа кавитации. В статье [63] изучается термодинамический эффект с помощью кавитации в трубке Вентури с использованием воды при температурах до относительно высоких уровней и при контролируемом содержании растворенного газа в резервуаре подачи. Характер кавитации (средняя длина прикрепленного облака полости) анализируется на основе результатов экспериментов, проведенных с холодной и горячей водой. В работе [64] представлены экспериментальные результаты исследования влияния нелинейных волновых и кавитационных процессов, протекающих в рабочих элементах потока в гидродинамических вихревых и плоских генераторах с проточными телами различной формы, на реологические свойства буровых растворов. Лабораторные исследования подтверждены промышленными экспериментами, позволившими значительно повысить эффек-

тивность бурения. Экспериментальные исследования механизма образования и развития кавитации в соплах рассмотрены и описаны в работе [65]. Обобщены различные эмпирические формулы, связывающие коэффициент расхода с гидродинамическими параметрами. Особенности работы колебательно-резонансных кавитаторов по сравнению с гидродинамическими кавитаторами исследуются в работе [66]. Выяснено, что повышение напряженности кавитационного поля, а следовательно, и увеличение производительности кавитационной обработки жидкости обеспечивают именно колебательно-резонансные кавитаторы. Лабораторный стенд для исследования изменения реологических свойств вязкой и высоковязкой нефти при гидродинамической кавитационной обработке приводится в работе [13], здесь же представлены результаты моделирования и лабораторных исследований. Влияние физических параметров на характеристики образовавшихся субмикронных пузырьков, созданных путем смешивания воды и газа методом гидродинамической кавитации, было рассмотрено в работе [67]. Было показано, что скорость образования пузырьков и их плотность в воде впрямую зависят от давления газа. В статье [68] описан подход к определению режима течения с использованием экспериментального гидродинамического стенд для исследования кавитационных процессов. Эксперименты с технической водопроводной водой подтвердили достоверность полученных натурных результатов с теоретическими значениями. Исследована зависимость гидродинамических режимов от средней скорости потока, числа Рейнольдса и числа кавитации. Математическое моделирование движения жидкостей, сопровождающегося явлением суперкавитации, рассматривается в статьях [68–71], где представлен общий подход к математическому моделированию. Предложенная математическая модель учитывает геометрию, начальные параметры и физические константы, характеризующие процесс.

### Заключение

Представленный обзор демонстрирует актуальность использования кавитационных технологий в различных областях науки и техники для решения важных практических задач и, как следствие, продолжения их всестороннего изучения. На основе рассмотренных публикаций можно сделать вывод, что наиболее эффективным для практического применения является гидродинамическая кавитация.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках проекта «Концепция развития теплоэнергетики Красноярского края».*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Continuous biodiesel production: a review of advances in catalysis, microfluidic and cavitation reactors / J.A. Okolie, J.I. Escobar, G. Umenweke, W. Khanday, P.U. Okoye // Fuel. – 2022. – V. 307. – № 121821.
2. Performance and emission characteristics of microbubble-enhanced fuels in a diesel engine / E.A. Alias, F.Y. Hagos, M.I. Ishak, F. Dzaharudin, A.A. Abdullah, A. Asyraff // Energy and Fuels. – 2021. – V. 35 (3). – P. 2630–2638.
3. Spiridonov E.K., Bityutskikh S.Y. Simulation model and characteristics of the cavitation mixer with hydrodynamic grid // Procedia Engineering. – 2016. – V. 150. – P. 210–214.
4. Setyawan M., Mulyono P., Budiman A. Comparison of *Nannochloropsis* sp. cells disruption between hydrodynamic cavitation

- and conventional extraction // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 154. – № 01023.
- 5. Cavitated charcoal – an innovative method for affecting the biochemical properties of soil / K. Gondek, M. Mierzwa-Hersztek, W. Grzymała, T. Głab, T. Bajda // Materials. – 2021. – V. 14 (9). – № 2466.
  - 6. Zheplinska M., Mushruk M., Salavor O. Cavitational impact on electrical conductivity in the beet processing industry // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2021. – P. 755–762.
  - 7. Liquid organic waste purification on the example of beet-sugar production using cavitation hydrodynamic generators / V. Mishchenko, A. Semenov, V. Yatsenko, T. Stepanova / Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – 1259 AISC. – P. 209–224.
  - 8. Technical and economic feasibility of a stable yellow natural colorant production from waste lemon peel / R. Cirimmina, B. Forest, F. Meneguzzo, M. Pagliaro, M.T. Hamann / Applied Sciences (Switzerland). – 2020. – V. 10 (19). – № 6812.
  - 9. Production of high-oleic palm oil nanoemulsions by high-shear homogenization (microfluidization) / L. Ricaurte, M.D.J. Perea-Flores, A. Martinez, M.X. Quintanilla-Carvajal / Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2016. – V. 35. – P. 75–85.
  - 10. Plant and biomass extraction and valorisation under hydrodynamic cavitation / W. Zhilin, F. Daniele, C. Daniele, B.V. Bosco, L. Stevanato // Processes. – 2019. – V. 7 (12). – 965.
  - 11. Омельянюк М.В., Пахлян И.А. Моделирование истечения затопленных и незатопленных струй // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 12. – С. 124–127.
  - 12. Омельянюк М.В., Пахлян И.А. Технологические приложения кавитационных струйных течений в нефтегазопромысловом деле // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 11. – С. 130–133.
  - 13. Application of technology of hydrodynamic cavitation processing high-viscosity oils for the purpose of improving the rheological characteristics of oils / Y.D. Zemenkov, M.Y. Zemenkova, A.A. Vengerov, A.E. Brand // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – 154 (1). – № 012026.
  - 14. Montes D., Cortés F.B., Franco C.A. Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized SiO<sub>2</sub> nanoparticles // DYNA (Colombia). – 2018. – V. 85 (207). – P. 153–160.
  - 15. Лабораторные и промысловые исследования волновых машин и аппаратов для приготовления тонкодисперсных суспензий / В.Ю. Артамонов, С.Р. Ганиев, Ю.С. Кузнецов, А.П. Пустовгар, Д.Р. Султанов, О.В. Шмырков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 47 (1). – С. 104–111.
  - 16. Role of mineral flotation technology in improving bitumen extraction from mined Athabasca oil sands. II. Flotation hydrodynamics of water-based oil sand extraction / J.Z. Zhou, H. Li, R.S. Chow, Q. Liu, Z. Xu, J. Masliyah / Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2020. – V. 98 (1). – P. 330–352.
  - 17. Nonequilibrium carbon black suspensions used in synthesis of polymer composite material / O.P. Stebeleva, L.V. Kashkina, E.A. Petrakovskaya, T.V. Rubleva, S.L. Nikitin, O.A. Vshivkova // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1515 (2). – № 022003.
  - 18. Слизнева Т.Е., Акулова М.В., Разговоров П.Б. Влияние механомагнитной активации растворов CaCl<sub>2</sub> и Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на фазовый состав цементного камня // Химия и химическая технология. – 2019. – № 62 (12). – С. 101–107.
  - 19. Krivenko P.V., Guzii S.G., Hela R. The influence of cavitation treatment on nano structuring of alkali aluminosilicate binder for intumescent coatings // Materials Science Forum. – 2017. – 908 MSF. – P. 63–70.
  - 20. Cavitation-free continuous-wave laser ablation from a solid target to synthesize low-size-dispersed gold nanoparticles / A.O. Kucherik, Y.V. Ryabchikov, S.V. Kurovskaya, A. Al-Kattan, S.M. Arakelyan, T.E. Itina, A.V. Kabashin // ChemPhysChem. – 2017. – V. 18 (9). – P. 1185–1191.
  - 21. Limited elemental mixing in nanoparticles generated by ultrashort pulse laser ablation of AgCu bilayer thin films in a liquid environment: atomistic modeling and experiments / C.-Y. Shih, C. Chen, C. Rehbock, A. Tymoczko, U. Wiedwald, M. Kamp, U. Schuermann, L. Kienle, S. Barcikowski, L.V. Zhigilei // Journal of Physical Chemistry. – 2021. – V. 125(3). P. – 2132–2155.
  - 22. Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N. Mechanical activation of wood for adhesive-free board production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – 155 (1). – № 012038.
  - 23. Unsteady flow process in mixed waterjet propulsion pumps with nozzle based on computational fluid dynamics / C. Luo, H. Liu, L. Cheng, C. Wang, W. Jiao, D. Zhang // Processes. – 2019. – V. 7 (12). – № 910.
  - 24. Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel / C. Ghera, I. Mitelea, I. Bordeasă, C. Crăciunescu // METAL 2016 – 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. – Brno, 2016. – P. 706–711.
  - 25. Banyai D., Sfarlea I., Opruta D. Experimental research on variable hydraulic resistors of servo-hydraulic valves // Energy Procedia. – 2016. – V. 85. – P. 44–51.
  - 26. Lubrication characteristics of a textured porous sliding bearing / S. Lee, D.-Y. Jang, X.Y. Wang, P. Kim, W. Sun, J. Seok // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – V. 7 (3). – P. 1–13.
  - 27. Miyanaga N., Tomioka J. Linear and nonlinear stability analysis of hydrodynamic journal bearings using mass-conservative cavitation model // Jurnal Tribologi. – 2019. – V. 22. – P. 61–73.
  - 28. Ding A., Xiao Y. Numerical investigation for characteristics and oil-air distributions of oil film in a tilting-pad journal bearing // Proceedings of the ASME Turbo Expo. – 2018. – GT2020-15151.
  - 29. Investigation of a flow step clogging incident: a precautionary note on the use of THF in commercial-scale continuous process / N.R. Rivera, B. Kassim, P. Grigorov, H. Wang, M. Armenante, X. Bu, A. Lekhal, N. Variankaval // Organic Process Research and Development. – 2019. – V. 23 (11). – P. 2556–2561.
  - 30. Vermes A.G., Lettier C. Source term based modeling of rotating cavitation in turbopumps // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2019. – V. 141 (6). – № 061002.
  - 31. Review of technologies for treatment of fuel oil during storage and preparation for burning in boiler units / N.A. Furnaces, V.I. Zroychikov, A. Kormilitsyn, V.S. Borozdin, A.V. Pay // Thermal Engineering. – 2020. – V. 67 (2). – P. 106–114.
  - 32. 降低减压渣油延迟焦化石油焦产品硫含量的研究 / K. Li, H. Chen, J. Lei, D. Zhang, J. Chen, X. Liu, H. Han // Petroleum Processing and Petrochemical. – 2019. – V. 50 (7). – P. 52–57.
  - 33. The impact of cavitation-activated water on combustion dynamics and environmental characteristics of coal-water slurry fuel / O.P. Stebeleva, L.V. Kashkina, E.A. Petrakovskaya, S.L. Nikitin, T.R. Valiullin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 537 (6). – № 062056.
  - 34. Мальцева Л.И., Белогурова Т.П., Кравченко И.В. Влияние высоконергетического воздействия на физико-технические характеристики угольных топлив // Теплоэнергетика. – 2017. – № 8. – С. 43–49.
  - 35. Estimating the Effectiveness of Hydrodynamic Treatment of Wood for Producing Wood Boards without Adhesives / V.N. Ermolin, M.A. Bayandin, S.N. Kazitsin, A.V. Namyatov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 467 (1). – № 012001.
  - 36. News research & development: biofuel production: bubbles break down biomass. TCE The Chemical Engineer. – 2016. – V. 898. – 21 p.
  - 37. Study on the degradation of phenol wastewater by the combination of Venturi pipe with orifice plate / Y.-J. Wang, R.-Y. Jin, W.-D. Kong, T.-S. Wang // Xianhai Huagong/Modern Chemical Industry. – 2017. – V. 37 (4). – P. 160–163.
  - 38. The effect of firing temperature on the composition and microstructure of a geocement-based binder of sodium water-glass / K. Sotiriadis, S. Guzii, I. Kumpová, P. Mácová, A. Viani // Solid State Phenomena. – 2017. – V. 267 SSP. – P. 58–62.
  - 39. Practical application of technology combining ozonation with hydrodynamic cavitation to algae removal from water / Z.-L. Wu, W.-M. Wang, W.-X. Li, Y. Zhao, C.-D. Tang, G. Cravotto // Journal of Ecology and Rural Environment. – 2016. – V. 32 (3). – № 1673–4831.
  - 40. Effect of NaCl and CO<sub>2</sub> on the inception control of hydrodynamic cavitation by gas solubility change / M. Li, R. Manica, B. Xiang, Q. Liu // Chemical Engineering Science. – 2021. – V. 246. – № 116997.
  - 41. 船舶压载水高级氧化处理技术海域应用效果分析 / X. Zhang, Y. Zhang, Y. Tian, X. Zhang, Z. Zhang, R. Liu // Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering. – 2019. – V. 45 (8). – P. 2681–2688.
  - 42. Treatment of Tofu industry's wastewater using combination of ozonation and hydrodynamic cavitations method with venturi injector / E.F. Karamah, A.R. Primasto, R.R. Najeges, S. Bismo // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1198 (6). – № 062007.

43. Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape / Z. Zhi-ying, L. Qian, W. Lu, Y. Li-ming, C. Wei-hua, L. Hui, F. Li, L. Feng-chen // Journal of Hydrodynamics. – 2020. – V. 32. – P. 468–485.
44. Spatiotemporal evolution of rotational natural cavitation in rotational supercavitating evaporator for desalination / Z.-Y. Zheng, L. Wang, W.-H. Cai, X. Zheng, Q. Li, T. Kunugi, H. Li, F.-C. Li // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. – 2020. – V. 142 (5). – № 051205.
45. Numerical simulation research on the optimization for blade shape of rotational supercavitating evaporator / Q. Li, J.P. Cheng, Z.Y. Zheng, F.C. Li, V.A. Kulagin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – 72 (Forum 6). – № 062055.
46. Numerical simulation of the temperature effects on the performance of rotational supercavitating evaporator / Z.Y. Zheng, J.P. Cheng, F.C. Li, M. Zhang, Q. Li, V.A. Kulagin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – 72 (Forum 6). – № 062054.
47. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination / Z.-Y. Zheng, Q. Li, L. Wang, L.-M. Yao, W.-H. Cai, V.A. Kulagin, H. Li, F.-C. Li // Desalination. – 2019. – V. 455. – P. 1–18.
48. Laouari A., Ghenaïet A. Investigation of steady and unsteady cavitating flows through a small Francis turbine // Renewable Energy. – 2021. – V. 172. – P. 841–861.
49. Jin W. Cavitation generation and inhibition. I. Dominant mechanism of turbulent kinetic energy for cavitation evolution // AIP Advances. – 2021. – V. 11 (6). – № 065028.
50. Kuimov D.N., Minkin M.S. Methods for modeling cavitation in pulp fiber grinding processes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – 1029 (1). – № 012045.
51. Mathematical basis and validation of the full cavitation model / A.K. Singhal, M.M. Athavale, H. Li, Y. Jiang // J. Fluids Eng. – 2002. – V. 124 (3). – P. 617–624.
52. Evaluation of vorticity forces in thermo-sensitive cavitating flow considering the local compressibility / T. Shen, X. Li, L. Li, Z. Wang, Y. Liu // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2021. – V. 120. – 105008.
53. Numerical investigation of attached cavitating flow in thermo-sensitive fluid with special emphasis on thermal effect and shedding dynamics / Sh. Zhang, X. Li, B. Hu, Y. Liu, Z. Zhu // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44 (5). – P. 3170–3184.
54. Laser cavitation rheology for measurement of elastic moduli and failure strain within hydrogels / J.C. Luo, H. Ching, B.G. Wilson, A. Mohraz, E.L. Botvinick, V. Venugopalan // Scientific Reports. – 2020. – V. 10 (1). – № 13144.
55. Pant C.Sh., Delorme Y., S Frankel. Accuracy assessment of RANS predictions of active flow control for hydrofoil cavitation // Processes. – 2020. – V. 8 (6). – 677.
56. Investigation of rib's effect in cavitation on an axisymmetric separated flow over a longitudinal blunt circular cylinder / H. Izadyar, A.H. Aghababaei, P. Forghani, A. Hajighasemi // SN Applied Sciences. – 2020. – V. 2 (4). – 588.
57. Kumar A., Ghobadian A., Nouri J.M. Assessment of cavitation models for compressible flows inside a nozzle // Fluids. – 2020. – V. 5 (3). – 134.
58. Hydrodynamic analysis of ultra-high pressure water derusting nozzle / L.-X. Ni, Z.-S. Chen, Z. Liu, X.-F. Feng // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. – Virtual, Online, 2020. – P. 1842–1850.
59. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения / А.Ю. Радзюк, В.А. Кулагин, Е.Б. Истягина, Т.А. Пьяных // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технология. – 2019. – Т. 12 (4). – С. 468–475.
60. Numerical investigation on the regime of cavitation shedding and collapse during the water-exit of submerged projectile / Y. Chen, Z. Gong, J. Li, X. Chen, C. Lu // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. – 2020. – V. 142 (1). – № 011403.
61. Kamisaka H., Soyama H. Enhancing the aggressive intensity of a cavitating jet by introducing water flow holes and a long guide pipe // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. – 2021. – V. 143 (3). – № 031201.
62. Hutili E., Nedeljkovi M.S., Czifrus S. Study and analysis of the cavitating and non-cavitating jets part two parameters controlling the jet action and a new formula for cavitation number calculation // Thermal Science. – 2020. – V. 24 (1 Part A). – P. 407–419.
63. Thermodynamic effects on Venturi cavitation characteristics / H. Zhang, Z. Zuo, K.A. Mørch, S. Liu // Physics of Fluids. – 2019. – V. 31 (9). – № 097107.
64. Ганиев С.Р., Кузнецов Ю.С., Шмырков О.В. Нелинейные волновые и кавитационные процессы и их влияние на механические свойства вязких растворов // Доклады академии наук. – 2019. – Т. 484. – № 4. – С. 410–414.
65. Sun Y., Guan Z., Hooman K. Cavitation in diesel fuel injector nozzles and its influence on atomization and spray // Chemical Engineering and Technology. – 2019. – V. 42 (1). – P. 6–29.
66. Electromagnetic vibratory cavitator / I.S. Aftanaziv, L.I. Shevchuk, I.Z. Koval, L.R. Strutynska, O.I. Strogan, A. Smolarz, A. Ormanbekova, K. Begaliyeva // Przeglad Elektrotechniczny. – 2019. – V. 95 (4). – P. 24–29.
67. Generation of submicron bubbles using Venturi tube method / I.G.P. Wiraputra, D. Edikresna, M.M. Munir, A.E. Khairurrijal // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 739 (1). – № 012058.
68. Determination of the flow regime using the experimental hydrodynamic stand / A.Yu. Radzyuk, V.A. Kulagin, E.B. Istyagina, T.A. Pianykh, M.V. Kolosov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 537 (4). – 042080.
69. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow / A.Yu. Radzyuk, V.A. Kulagin, E.B. Istyagina, T.A. Pyanykh, M.V. Kolosov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 315. – I. 3.
70. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench / A.Yu. Radzyuk, V.A. Kulagin, E.B. Istyagina, T.A. Pyanykh, I.I. Grishina // Journal of Physics: Conference Series. Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019: International Scientific Conference. – Krasnoyarsk, Russia, 2019. – P. 22050.
71. Verification of the results of numerical modeling of the developed cavitation in a cramped flow by experimental data / A.Yu. Radzyuk, E.B. Istyagina, T.A. Pyanykh, M.P. Baranova, I.I. Grishina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 734 (1). – 12192.

Поступила 15.06.2022 г.

## Информация об авторах

**Радзюк А.Ю.**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Сибирского федерального университета.

**Истягина Е.Б.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Сибирского федерального университета.

**Кулагина Л.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной и экологической безопасности Сибирского федерального университета.

**Жуков А.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Сибирского федерального университета.

UDC 532.528

## CURRENT STATE OF USING CAVITATION TECHNOLOGIES (BRIEF OVERVIEW)

**Alexander Yu. Radzyuk<sup>1</sup>,**  
aradzyuk@sfu-kras.ru

**Elena B. Istyagina<sup>1</sup>,**  
eistyagina@sfu-kras.ru

**Ludmila V. Kulagina<sup>1</sup>,**  
klvation@gmail.com

**Andrey V. Zhiukov<sup>1</sup>,**  
azhiukov@sfu-kras.ru

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660036, Russia.

**The relevance.** There are known examples of obtaining homogeneous fluids based on coals, petroleum products, asbestos, cement and other georesources using the effects of hydrodynamic cavitation. The efficiency of cavitation treatment of multiphase media depends on many factors, such as the type of cavitation (acoustic and hydrodynamic), the composition of the treated medium, flow regime, temperature, pressure, viscosity and many others. A variety of ways of application of cavitation technologies does not allow developing unified approaches to assessment of their efficiency, in this regard, their comparison on the basis of individual criteria for each technological process acquires relevance.

**The main aim** of the research is to make conclusions about which of the used methods of cavitation treatment have the greatest efficiency in changing the technological parameters of the processed media on the basis of the analysis and summaries of the current state of using cavitation technologies in thermal power engineering, chemical and oil industries, nuclear power, etc.

**Objects:** technologies, devices and apparatuses in which during dispersion, emulsification, homogenization, purification, etc., there are modes of flow of treated media accompanied by cavitation phenomena.

**Methods:** analysis of information on the application of cavitation technologies given in publications over the past five years in journals indexed in the international databases Web of Science and Scopus.

**Results.** The paper introduces the analysis of literary sources in the field of cavitation technologies. The main results of works on cavitation treatment of various liquid compositions obtained by the authors of the articles are presented. Mechanisms of cavitation influence, application of cavitation technologies in various branches, actual methods and means of studying cavitation phenomena are considered. Conclusions about the main advantages and disadvantages of using cavitation technology as an element of technological processing are made. It is shown that the most effective is the impact on the processed media by hydrodynamic cavitation.

### Key words:

Cavitation, processing intensification, mixing devices, dispersion, emulsification, homogenization.

The research was financially supported by the Krasnoyarsk Krai Government, Krasnoyarsk Krai Foundation for Support of Scientific and Technical Activities (Project no. 2022031008477).

### REFERENCES

1. Okolie J.A., Escobar I.J., Umenweke G., Khanday W., Okoye P.U. Continuous biodiesel production: a review of advances in catalysis, microfluidic and cavitation reactors. *Fuel*, 2022, vol. 307, no. 121821. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121821
2. Alias E.A., Hagos F.Y., Ishak M.I., Dzaharudin F., Abdullah A.A., Asyraff A. Performance and Emission characteristics of microbubble-enhanced fuels in a diesel engine. *Energy and Fuels*, 2021, vol. 35 (3), pp. 2630–2638. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03204
3. Spiridonov E.K., Bitutskikh S.Y. Simulation model and characteristics of the cavitation mixer with hydrodynamic grid. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 210–214. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.748
4. Setyawan M., Mulyono P., Sutijan Budiman A. Comparison of Nannochloropsis sp. cells disruption between hydrodynamic cavitation and conventional extraction. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 154, no. 01023. DOI: 10.1051/matecconf/201815401023
5. Gondek K., Mierzwa-Hersztek M., Grzymala W., Głąb T., Bajda T. Cavitated charcoal – an innovative method for affecting the biochemical properties of soil. *Materials*, 2021, vol. 14 (9), no. 2466. DOI: 10.3390/ma14092466
6. Zheplinska M., Mushtruk M., Salavor O. Cavitational impact on electrical conductivity in the beet processing industry. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 755–762. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5\_73
7. Mishchenko V., Semenov A., Yatsenko V., Stepanova T. Liquid organic waste purification on the example of beet-sugar production using cavitation hydrodynamic generators. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, 1259 AISC, pp. 209–224. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6\_18
8. Cirimmina R., Forest B., Meneguzzo F., Pagliaro M., Hamann M.T. Technical and economic feasibility of a stable yellow natural colorant production from waste lemon peel. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, vol. 10 (19), no. 6812. DOI: 10.3390/app10196812
9. Ricaurte L., Perea-Flores M.D.J., Martinez A., Quintanilla-Carvajal M.X. Production of high-oleic palm oil nanoemulsions by high-shear homogenization (microfluidization). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, vol. 35, pp. 75–85. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.04.004
10. Zhilin Wu, Ferreira D.F., Crudo D., Bosco V., Stevanato L., Costale A., Cravotto G. Plant and Biomass Extraction and Valorisation under Hydrodynamic Cavitation. *Processes*, 2019, vol. 7 (12), 965. DOI: Doi.org/10.3390/pr7120965
11. Omelyanyuk M.V., Pakhlyan I.A. Simulation of flooded and unflued jets for improving technology of high-pressure purification of oil and gas field equipment. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil In-*

- dustry, 2020, vol. 2020 (12), pp. 124–127. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-12-124-127
12. Omelyanyuk M.V., Pakhlyan I.A. Technological application of cavitating jet streams in the oil and gas industry. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2019 (11), vol. 12, pp. 130–133. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-11-130-133. In Rus.
  13. Zemenkov Y.D., Zemenkova M.Y., Vengerov A.A., Brand A.E. Application of technology of hydrodynamic cavitation processing high-viscosity oils for the purpose of improving the rheological characteristics of oils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 154 (1), no. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012026.
  14. Montes D., Cortés F.B., Franco C.A. Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized  $\text{SiO}_2$  nanoparticles. *DYNA (Colombia)*, 2018, vol. 85 (207), pp. 153–160. DOI: 10.15446/dyna.v85n207.71804
  15. Artamonov V.Y., Ganiev S.R., Kuznetsov Y.S., Pustovgar A.P., Sultanov D.R., Shmyrkov O.V. Laboratory and field testing of wave machines and devices for preparation of fine-particle suspensions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, vol. 47 (1), pp. 104–111. DOI: 10.3103/S1052618818010028
  16. Zhou J.Z., Li H., Chow R.S., Liu Q., Xu Z., Masliyah, J. Role of mineral flotation technology in improving bitumen extraction from mined Athabasca oil sands. II. Flotation hydrodynamics of water-based oil sand extraction. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2020, vol. 98 (1), pp. 330–352. DOI: 10.1002/cjce.23598.
  17. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Petrakovskaya E.A., Rubleva T.V., Nikitin S.L., Vshivkova O.A. Nonequilibrium carbon black suspensions used in synthesis of polymer composite material. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1515 (2), no. 022003. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/2/022003
  18. Slizneva T.E., Akulova M.V., Razgovorov P.B. Influence of mechanochemical activation of solutions  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  on phase structure of cement stone. *ChemChemTech*, 2019, vol. 62 (12), pp. 101–107. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6114
  19. Krivenko P.V., Guzii S.G., Hela R. The influence of cavitation treatment on nano structuring of alkali aluminosilicate binder for intumescence coatings. *Materials Science Forum*, 2017, 908 MSF, pp. 63–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.908.63.
  20. Kucherik A.O., Ryabchikov Y.V., Kutrovskaya S.V., Al-Kattan A., Arakelyan S.M., Itina T.E., Kabashin A.V. Cavitation-free continuous-wave laser ablation from a solid target to synthesize low-size-dispersed gold nanoparticles. *ChemPhysChem*, 2017, vol. 18 (9), pp. 1185–1191. DOI: 10.1002/cphc.201601419
  21. Shih C.-Y., Chen C., Rehbock C., Tymoczko A., Wiedwald U., Kamp M., Schuermann U., Kienle L., Barcikowski S., Zhigilei L.V. Limited elemental mixing in nanoparticles generated by ultrashort pulse laser ablation of  $\text{AgCu}$  bilayer thin films in a liquid environment: atomistic modeling and experiments. *Journal of Physical Chemistry*, 2021, pp. 1185–1191. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c09970
  22. Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N. Mechanical activation of wood for adhesive-free board production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 155 (1), no. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012038
  23. Luo C., Liu H., Cheng L., Wang C., Jiao W., Zhang D. Unsteady flow process in mixed waterjet propulsion pumps with nozzle based on computational fluid dynamics. *Processes*, 2019, vol. 7 (12), no. 910. DOI: 10.3390/PR7120910
  24. Gheră C., Mitelea I., Bordeău I., Crăciunescu C. Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel. *METAL 2016 – 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials. Conference Proceedings*. Brno, 2016. pp. 706–711.
  25. Banyai D., Sfarlea I., Opruta D. Experimental research on variable hydraulic resistors of servo-hydraulic valves. *Energy Procedia*, 2016, vol. 85, pp. 44–51. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.273
  26. Lee S., Jang D.-Y., Wang X.Y., Kim P., Sun W., Seok J. Lubrication characteristics of a textured porous sliding bearing. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, vol. 7 (3), pp. 1–13. DOI: 10.1177/1687814015573618
  27. Miyanaga N., Tomioka J. Linear and nonlinear stability analysis of hydrodynamic journal bearings using mass-conservative cavitation model. *Jurnal Tribologi*, 2019, vol. 22, pp. 61–73.
  28. Ding A., Xiao Y. Numerical investigation for characteristics and oil-air distributions of oil film in a tilting-pad journal bearing. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2018, 7B-2018. DOI: 10.1115/GT2018-75888
  29. Rivera N.R., Kassim B., Grigorov P., Wang H., Armenante M., Bu X., Lekhal A., Variankaval N. Investigation of a flow step clogging incident: a precautionary note on the use of thf in commercial-scale continuous process. *Organic Process Research and Development*, 2019, vol. 23 (11), pp. 2556–2561. DOI: 10.1021/acs.oprd.9b00366
  30. Vermet A.G., Lettieri C. Source term based modeling of rotating cavitation in turbopumps. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, vol. 141 (6), no. 061002. DOI: 10.1115/1.4042302
  31. Zroychikov N.A., Kormilitsyn V.I., Borozdin V.S., Pay A.V. A review of technologies for treatment of fuel oil during storage and preparation for burning in boiler units' furnaces. *Thermal Engineering*, 2020, vol. 67 (2), pp. 106–114. DOI: 10.1134/S0040601520020068
  32. Li K., Chen H., Lei J., Zhang D., Chen J., Liu X., Han H. Study on desulfurization of petroleum coke from vacuum residue delayed coker. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2019, 50 (7), pp. 52–57. In Chinese.
  33. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Petrakovskaya E.A., Nikitin S.L., Valiullin T.R. The impact of cavitation-activated water on combustion dynamics and environmental characteristics of coal-water slurry fuel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 537 (6), no. 062056. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062056
  34. Maltsev L.I., Belogurova T.P., Kravchenko I.V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, pp. 585–590. DOI: Doi.org/10.1134/S0040601517080067
  35. Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. Estimating the Effectiveness of Hydrodynamic Treatment of Wood for Producing Wood Boards without Adhesives. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 467 (1), no. 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/467/1/012001.
  36. News research & development: Biofuel production: Bubbles break down biomass. *TCE The Chemical Engineer*, 2016, (898), 21 p.
  37. Wang Y.-J., Jin R.-Y., Kong W.-D., Wang T.-S. Study on the degradation of phenol wastewater by the combination of Venturi pipe with orifice plate. *Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry*, 2017, vol. 37 (4), pp. 160–163. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.04.039
  38. Sotiriadis K., Guzii S., Kumpová I., Mácová P., Viani A. The effect of firing temperature on the composition and microstructure of a geocement-based binder of sodium water-glass. *Solid State Phenomena*, 2017, 267 SSP, pp. 58–62. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.267.58
  39. Wu Z.-L., Wang W.-M., Li W.-X., Zhao Y., Tang C.-D., Cravotto, G. Practical application of technology combining ozonation with hydrodynamic cavitation to algae removal from water. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, vol. 32 (3), no. 1673-4831 (2016)03-0500-07, pp. 500–506. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.03.025
  40. Li M., Manica R., Xiang B., Liu Q. Effect of  $\text{NaCl}$  and  $\text{CO}_2$  on the inception control of hydrodynamic cavitation by gas solubility change. *Chemical Engineering Science*, 2021, vol. 246, no. 116997. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116997
  41. Zhang X., Zhang Y., Tian Y., Zhang X., Liu R. Analysis on application effectiveness of ballast water treatment based on advanced oxidation processes. *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*, 2019, 45 (8), pp. 2681–2688. In Chinese. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180619007
  42. Karamah E.F., Primasto A.R., Najeges R.R., Bismo S. Treatment of Tofu industry's wastewater using combination of ozonation and hydrodynamic cavitations method with venturi injector. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1198 (6), no. 062007. DOI: 10.1088/1742-6596/1198/6/062007
  43. Zhi-ying Zheng Qian Li, Lu Wang, Li-ming Yao, Wei-hua Cai, Hui Li, Feng-chen Li. Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, vol. 32, pp. 468–485
  44. Zheng Z.-Y., Wang L., Cai W.-H., Zheng X., Li Q., Kunugi T., Li H., Li F.-C. Spatiotemporal evolution of rotational natural cavitation

- in rotational supercavitating evaporator for desalination. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2020, vol. 142 (5), no. 051205. DOI: 10.1115/1.4045612
45. Li Q., Cheng J.P., Zheng Z.Y., Li F.C., Kulagin V.A. Numerical simulation research on the optimization for blade shape of rotational supercavitating evaporator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 72 (Forum 6), no. 062055. DOI: 10.1088/1757-899X/72/6/062055
46. Zheng Z.Y., Cheng J.P., Li F.C., Zhang M., Li Q., Kulagin V.A. Numerical simulation of the temperature effects on the performance of rotational supercavitating evaporator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 72 (Forum 6), no. 062054. DOI: 10.1088/1757-899X/72/6/062054
47. Zheng Z.-Y., Li Q., Wang L., Yao L.-M., Cai W.-H., Kulagin V.A., Li H., Li F.-C. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination. *Desalination*, 2019, vol. 455, pp. 1–18
48. Laouari A., Ghenaït A. Investigation of steady and unsteady cavitating flows through a small Francis turbine. *Renewable Energy*, 2021, vol. 172, pp. 841–861. DOI: 10.1016/j.renene.2021.03.080
49. Jin W. Cavitation generation and inhibition. I. Dominant mechanism of turbulent kinetic energy for cavitation evolution. *AIP Advances*, 2021, vol. 11 (6), no. 065028, DOI: 10.1063/5.0050231
50. Kuimov D.N., Minkin M.S. Methods for modeling cavitation in pulp fiber grinding processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1029 (1), no. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012045
51. Ashok K. Singhal, Mahesh M. Athavale, Huiying Li, Yu Jiang. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. *J. Fluids Eng.*, 2002, vol. 124 (3), pp. 617–624. DOI: Doi.org/10.1115/1.1486223
52. Shen T., Li X., Li L., Wang Z., Liu Y. Evaluation of vorticity forces in thermo-sensitive cavitating flow considering the local compressibility. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 120, 105008.
53. Shaofeng Zhang, Xiaojun Li, Bo Hu, Yang Liu, Zuchao Zhu. Numerical investigation of attached cavitating flow in thermo-sensitive fluid with special emphasis on thermal effect and shedding dynamics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 5, pp. 3170–3184.
54. Luo J.C., Ching H., Wilson B.G., Mohraz A., Botvinick E.L., Venugopalan V. Laser cavitation rheology for measurement of elastic moduli and failure strain within hydrogels. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10 (1), no. 13144. DOI: 10.1038/s41598-020-68621-y
55. Pant Ch.Sh., Delorme Y., Frankel S. Accuracy assessment of RANS predictions of active flow control for hydrofoil cavitation. *Processes*, 2020, vol. 8 (6), 677. DOI: Doi.org/10.3390/pr8060677
56. Izadyar H., Aghababaei A.H., Forghani P., Hajighasemi A. Investigation of rib's effect in cavitation on an axisymmetric separated flow over a longitudinal blunt circular cylinder. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, no. 4, 588.
57. Aishvarya K., Ali G., Jamshid M.N. Assessment of cavitation models for compressible flows inside a nozzle. *Fluids*, 2020, vol. 5 (3), 134. DOI: Doi.org/10.3390/fluids5030134
58. Ni L.-X., Chen Z.-S., Liu Z., Feng X.-F. Hydrodynamic analysis of ultra-high pressure water derusting nozzle. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. Virtual, Online, 2020, pp. 1842–1850.
59. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pianykh T.A. Modernization of the cavitation stand for the investigation of two-phase flow regimes. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2019, vol. 12 (4), pp. 468–475. In Rus.
60. Chen Y., Gong Z., Li J., Chen X., Lu C. Numerical investigation on the regime of cavitation shedding and collapse during the water-exit of submerged projectile. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2020, vol. 142 (1), no. 011403. DOI: 10.1115/1.4044831
61. Kamisaka H., Soyama H. Enhancing the aggressive intensity of a cavitating jet by introducing water flow holes and a long guide pipe. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2021, vol. 143 (3), no. 031201. DOI: 10.1115/1.4048683
62. Hutili E., Nedeljković M.S., Czifrus S. Study and analysis of the cavitating and non-cavitating jets part two parameters controlling the jet action and a new formula for cavitation number calculation. *Thermal Science*, 2020, vol. 24 (1 Part A), pp. 407–419. DOI: 10.2298/TSCI190428334H
63. Zhang H., Zuo Z., Mørch K.A., Liu S. Thermodynamic effects on Venturi cavitation characteristics. *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31 (9), no. 097107. DOI: 10.1063/1.5116156
64. Ganiev S.R., Kuznetsov Y.S., Shmyrkov O.V. Nonlinear wave and cavitation processes and their effect on the mechanical properties of viscous solutions. *Doklady Physics*, 2019, vol. 64 (2), pp. 49–52. DOI: 10.1134/S1028335819020010
65. Sun Y., Guan Z., Hooman K. Cavitation in diesel fuel injector nozzles and its influence on atomization and spray. *Chemical Engineering and Technology*, 2019, vol. 42 (1), pp. 6–29. DOI: 10.1002/ceat.201800323.
66. Aftanaziv I.S., Shevchuk L.I., Koval I.Z., Strutynska L.R., Strogan O.I., Smolarz A., Ormanbekova A., Begaliyeva K. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2019, vol. 95 (4), pp. 24–29. DOI: 10.15199/48.2019.04.05
67. Wiraputra I.G.P.A.E., Edikresma D., Munir M.M., Khairurrijal. Generation of Submicron Bubbles using Venturi Tube Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 739 (1), no. 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/739/1/012058
68. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pianykh T.A., Kolosov M.V. Determination of the flow regime using the experimental hydrodynamic stand. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 537 (4), DOI: 10.1088/1757-899X/537/4/042080
69. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pianykh T.A., Kolosov M.V. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 315 (3), 032027. DOI: 10.1088/1755-1315/315/3/032027
70. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pyanykh T.A., Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench. *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference. Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019*. Krasnoyarsk, Russia, 2019. p. 22050. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/2/022050
71. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Pyanykh T.A., Baranova M.P., Grishina I.I. Verification of the results of numerical modeling of the developed cavitation in a cramped flow by experimental data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, p. 12192. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012192

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

- Alexander Yu. Radzyuk**, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.
- Elena B. Istyagina**, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.
- Ludmila V. Kulagina**, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.
- Andrey V. Zhuikov**, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.

УДК 504.3.054

## МИНЕРАЛЬНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ТВЕРДОГО ОСАДКА СНЕГОВОГО ПОКРОВА В РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗОНАХ Г. УСОЛЬЕ-СИБИРСКОЕ

Холодова Марина Сергеевна<sup>1</sup>,  
akimova@igc.irk.ru

Пастухов Михаил Владимирович<sup>1</sup>,  
tmast@igc.irk.ru

Бычинский Валерий Алексеевич<sup>1</sup>,  
val@igc.irk.ru

Просекин Сергей Николаевич<sup>1,2</sup>,  
pros.sergey@igc.irk.ru

Белозерова Ольга Юрьевна<sup>1</sup>,  
obel@igc.irk.ru

<sup>1</sup> Институт геохимии им. Виноградова СО РАН,  
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А.

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**Актуальность** изучения химического состава твердого осадка снегового покрова г. Усолье-Сибирского предопределили данные Минприроды России, приведенные в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации», которые показывают значительное ухудшение экологической обстановки в период с 2012 по 2017 гг. В 2020 г. Иркутская область заняла третье место среди регионов Сибири по промышленным выбросам в атмосферу. Отмечено пять самых загрязненных городов – Братск, Зима, Черемхово, Усолье-Сибирское и Шелехов, в которых, несмотря на применяемые в настоящее время более современные очистные сооружения, показатели загрязнения выросли по сравнению с предыдущим периодом. Особую актуальность работе придает тот факт, что на расстоянии всего 120 км от района исследования находится озеро Байкал – уникальный природный объект, отнесенный к Участкам Мирового Наследия. Река Анара, вытекающая из оз. Байкал, – главный источник питьевой воды для населения прибрежных городов, протекает в непосредственной близости от зон сосредоточения промышленных производств.

**Цель:** оценка экологического состояния воздуха г. Усолье-Сибирское по результатам снегогеохимического мониторинга и геоинформационного картирования.

**Объекты:** твердый осадок снегового покрова г. Усолье-Сибирского Иркутской области.

**Методы.** Химический состав твердого осадка снегового покрова определяли методом ISP-MS, анализ ртути проведен методом атомной абсорбции на спектрометре «РА-915+», минеральный состав твердого осадка снега определен рентгено-спектральным электронно-зондовым микронализом.

**Результаты.** Представлены результаты исследования минерального и микроэлементного составов твердого осадка снегового покрова в функциональных зонах г. Усолье-Сибирское. Идентифицированы химические элементы и минералы – маркеры техногенных источников загрязнения. С помощью ГИС выполнено картирование, результаты которого помогли выделить ореолы со слабой, средней и сильной степенью загрязнения.

### Ключевые слова:

Загрязнение, микроэлементы, минеральный состав, снеговой покров, промышленная зона, фоновый район, Усолье-Сибирское.

### Введение

В период стремительного развития мировой промышленности произошло значительное повышение техногенной эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу. Воздушными потоками газообразные и твердые вещества распространяются на большие расстояния, достигая удаленных от промышленных центров регионов мира [1]. Недавние исследования показали, что загрязнение атмосферного воздуха может существенно увеличивать риск развития у людей различных заболеваний, включая диабет и болезнь Альцгеймера [2–4]. В связи с этим особо актуальной экологической проблемой является контроль загрязнения атмосферного воздуха, выявление ореолов рассеивания и источников поступления потенциально токсич-

ных элементов, принятие мер по минимизации негативных воздействий на окружающую среду и живые организмы. Одним из наиболее объективных индикаторов загрязнения атмосферы в условиях Восточной Сибири является снеговой покров, осаждающий и аккумулирующий химические элементы различного генезиса. Снег является важным компонентом, участвующим в перераспределении загрязняющих веществ в наземных и водных экосистемах. Так, например, при снеготаяние часть элементов-загрязнителей поступает из снегового покрова в поверхностный слой подстилающих почв, другая часть включается в поверхностный сток, в значительной мере увеличивая их концентрации в ближайших водоемах и водотоках [5]. Ежегодная миграция твердых частиц, обогащен-

ных микроэлементами, из снегового покрова в почвы и донные отложения создает зоны повышенного загрязнения, это, в свою очередь, приводит к негативной трансформации среды обитания растений и животных, нарушению экологического равновесия и биоразнообразия [5–8]. Такие изменения наиболее характерны для территорий, прилегающих к крупным промышленным производствам. В Прибайкалье одним из наиболее загрязненных промышленных центров является г. Усолье-Сибирское, расположенный вдоль левого берега р. Ангары. Наибольший вклад в техногенное загрязнение г. Усолье-Сибирское вносит предприятие «Усольехимпром» (УХП), где с помощью метода ртутного электролиза производилась продукция: хлор и каустическая сода. Таким образом, ртуть, которая на протяжении нескольких десятилетий в больших объемах поступала в окружающую среду, стала основным загрязнителем исследуемой территории. В данный момент предприятие УХП закрыто. Однако загрязняющие вещества, поступившие в течение 26 лет, продолжают воздействовать на окружающую среду. На территории города развита фармацевтическая (АО «Фармасинтез»), машиностроительная ( завод ОАО ПО «Усольмаш» производство оборудования для горных работ) и мясоперерабатывающая промышленность (СХПК «Усольский свинокомплекс») и топливно-энергетический комплекс (ТЭЦ-11). В научных публикациях [9–13] широко обсуждается проблема ртутного загрязнения основных компонентов окружающей среды, полученного в результате деятельности предприятия УХП, в то же время изучению минерально-вещественного состава как индикатора антропогенного загрязнения атмосферного воздуха города уделено недостаточно внимания. Поэтому существует необходимость получения таких данных для твердого осадка снегового покрова рассматриваемой территории. Изучение минерально-вещественного состава твердых аэрозолей важно для лучшего понимания путей миграции загрязнителей и определения степени их воздействия на биологические объекты, включая человека [14–16].

Цель данной работы состоит в изучении микроэлементного (V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Th, U, Hg) и минерально-вещественного составов твердого осадка снегового покрова техногенно нагруженного участка Прибайкалья – г. Усолье-Сибирское. Это позволит выявить особенности распространения элементов-загрязнителей, поступающих от разных источников, а также поможет разработать рекомендации по геоэкологическому мониторингу крупных промышленных центров.

#### Объекты и методы исследования

Всего за 2010–2020 гг. было отобрано 28 проб твердого осадка снегового покрова. Территория г. Усолье-Сибирское была условно поделена на две функциональные зоны – промышленная и селестебная (городская). Фоновый район – территория Южного Байкала, напротив п. Листвянка.

Промышленная зона, расположенная в западной части города, вытянута вдоль левобережья р. Ангары.

На её территории расположены производственные площадки – это заброшенная производственная площадка ООО «Усольехимпром» (УХП), Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ-11), шламонакопитель (рис. 1). Шламонакопитель расположен в 2 км от р. Ангары и р. Белой. Согласно статистической отчетности УХП, объем накопленного шлама составляет 3,4 млн м<sup>3</sup>. В настоящее время водное зеркало, ранее покрывавшее всю площадь накопителя, отсутствует, что приводит к атмосферному переносу твердых ртутьсодержащих отходов. По территории г. Усолье-Сибирское протекают реки Белая и Ангара, которые используются жителями региона как основные источники питьевого и рыбохозяйственного назначения. Потенциальная опасность заключается в том, что высокотоксичные элементы с атмосферным переносом и поверхностным стоком поступают и в акватории рек. В настоящее время достоверные данные по содержанию ртути и других токсичных элементов, накопленных в шламонакопителе, а также в зоне его влияния, отсутствуют. Площадь УХП составляет 610 гектаров. На территории селестебной зоны г. Усолье-Сибирское площадью 74 тыс. га сосредоточены жилые дома, административные здания, объекты культуры.

Для сравнительной оценки загрязнения исследуемой территории в качестве фонового объекта выбрана акватория оз. Байкал, в наименьшей степени подверженная антропогенному воздействию. Отбор проб снегового покрова проводился на 6 станциях Южного Байкала, равномерно распределенных по трансекту между восточным и западным берегом от пос. Танхой до п. Листвянка (рис. 1). В качестве фоновых концентраций микроэлементов в работе использовались их медианные значения.

Снегогеохимическая съемка проводилась в конце зимнего периода, перед началом подтаивания (февраль–март), когда снег еще не начал гранулироваться. Отбор проб проводился с учетом розы ветров по общепринятой методике [17], методическим рекомендациям ИМГРЭ [18]. В среднем плотность отбора снегового покрова составляла одна пробы на 1 км<sup>2</sup>. Необходимый отбираемый объем (вес) пробы зависел от высоты снегового покрова. Пробы отбирались пластиковым совком (белого цвета). При этом особое внимание обращалось на отбор снегового покрова у земной поверхности (5 см над почвой) с целью исключения влияния почвенного покрова. Отобранные снеговые пробы доставлялись в лабораторию, до начала их обработки хранились в холодном неотапливаемом помещении с температурой, исключающей таяние снега. Для подготовки пробы снеговой покров подлежал таянию при комнатной температуре, затем снеговую воду фильтровали через фильтр (синяя лента), а твердый осадок высушивали, просеивали через сито 0,8 мм и взвешивали до постоянного веса.

Все виды химического анализа проводили в Изотопно-геохимическом центре коллективного пользования Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН). Микроэлементный анализ проб (Fe, Zn, Cd, Pb, Hg) проведен с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанный плазмой (ICP

MS Finnigan Element 2). Содержание ртути осуществлено методом атомной абсорбции на спектрометре «РА-915+» с приставкой «РП-91С». Минеральный состав изучен методом рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализатора (PCMA) на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония). С помощью PCMA проанализировано 3 образца.

Проба, отобранная на территории промзоны г. Усолье-Сибирское, проба с парковой территории г. Усолье-Сибирское и проба с фонового участка п. Листвянка (оз. Байкал). В ходе исследований была оценена неоднородность фазового минерального и химического состава исследуемого материала.

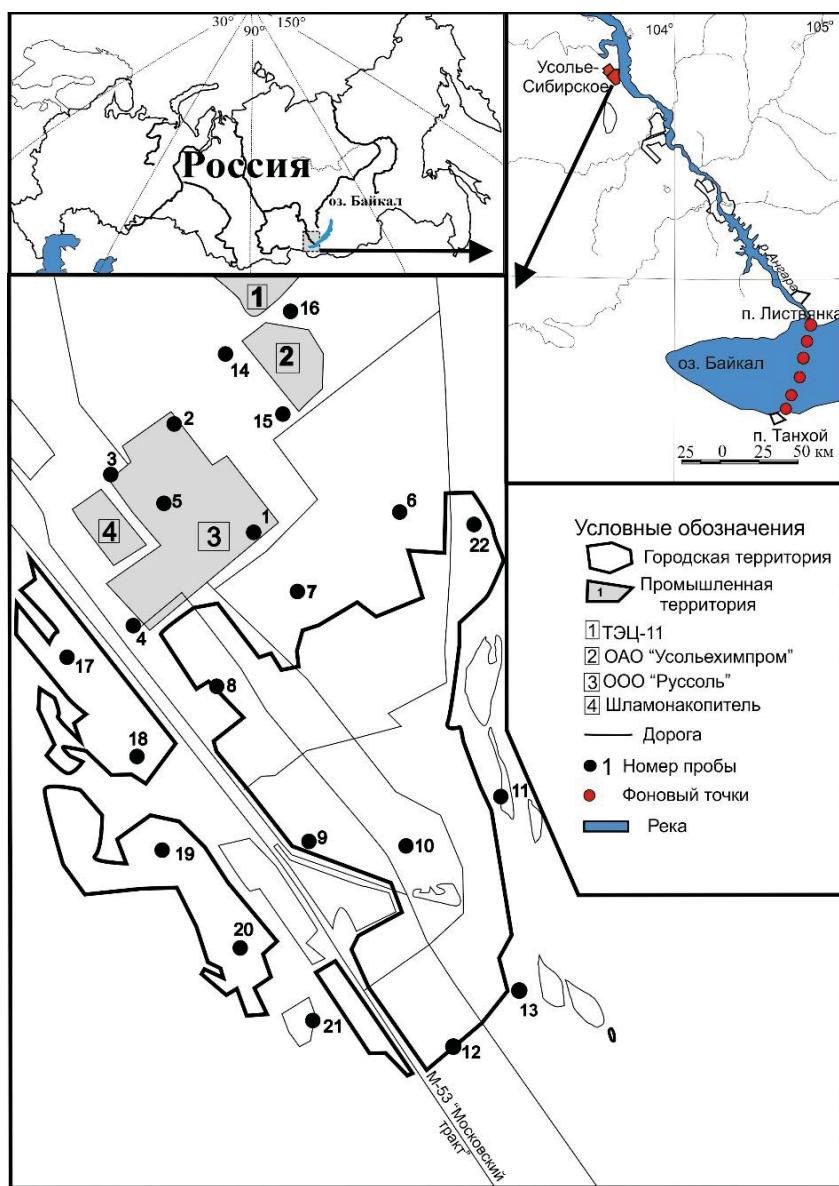


Рис. 1. Общая карта-схема расположения района исследования точек опробования снегового покрова г. Усолье-Сибирское

Fig. 1. General map-layout of the area under study of the testing snow cover points in Usolye-Sibirskoe

Количественной мерой воздействия ряда элементов на окружающую среду служит  $Z_c$  – суммарный показатель загрязнения, который вычисляется по формуле:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1),$$

где  $K_c$  – коэффициент концентрации элемента;  $n$  – число учитываемых элементов с  $K_c > 1$ ; коэффициент концентрации ( $K_c$ ) рассчитывается:

$$K_c = C_i / C_f,$$

где  $C_i$  – содержание элемента в пробе;  $C_f$  – фоновое содержание.

Для обработки аналитических данных использовались программы Grapher и Microsoft Excel 2007. Для построения графиков, таблиц, карт использовались программы CorelDRAW X3, QGIS. Кластерный анализ выполнялся при помощи надстройки «Cluster» для Microsoft Excel. В данной надстройке есть возможность Q и R типа анализа. Благодаря этому удалось показать ассоциации элементов, характерных

для различных источников загрязнения, функционирующих на исследуемой территории.

### Результаты и обсуждения исследования

#### Микроэлементный состав твердого осадка

Содержание тяжелых металлов снегового покрова г. Усолье-Сибирское представлено в табл. 1.

**Таблица 1.** Концентрации химических элементов в твердой фазе снегового покрова на территории г. Усолье-Сибирское по данным ISP-MS (мг/кг)

**Table 1.** Concentrations of chemical elements in the solid phase of snow cover on the territory of Usvolye-Sibirskoe according to ISP-MS data (mg/kg)

Элемент Element	Промышленная зона (n=13) Industrial zone (n=13)	Городская зона (n=9) Urban area (n=9)	Фон* (n=6) Background* (n=6)
V	270±32	150±57	70
Mn	706±77	560±79	315,3
Fe	53226±47491	41994±20258	24111,9
Co	56±10	32±11	16,1
Ni	123±13	83±20	50
Cu	266±48	160±81	50
Zn	329±50	203±53	198,8
As	39±7	26±9	10,4
Cd	0,3±0,05	0,2±0,06	0,11
Pb	145±39	90±28	44,6
Th	33±5	21±9	12,3
U	14±2	9±4	3,1
Hg	0,6±0,1	0,3±0,08	0,02
Zc	129	68	—

Примечание: ± стандартное отклонение; \* – фон п. Листяняка (оз. Байкал).

Note: ± standard deviation; \* – background of Listvyanka village (Lake Baikal).

Построение для территории г. Усолье-Сибирское площадных моноэлементных карт (рис. 3) распределения микроэлементов в твердом осадке снегового покрова позволило выявить ореолы повышенных содержаний элементов.

Концентрации Zn были максимальными на территории промышленной зоны УХП (табл. 1), при сравнении с городской зоной и фоном превышение составило 2 раза. Такое распределение Zn в снеговом покрове характерно для многих территорий, испытывающих влияние подобных промышленных производств. Так, например, в городах Улан-Батор, Чита, Благовещенск [19, 20] на территории промышленных зон, включающих теплоэлектро станции, комбинаты питания и т. д., отмечается повышение содержания Zn.

Природные же концентрации Zn в снеговом покрове других регионов заметно отличаются. Самые низкие концентрации Zn – в твердой фазе снегового покрова Антарктиды [21]. По данным [22] концентрация Zn на архипелаге Шпицберген, расположенным в Северном Ледовитом океане, достигает 31 мкг/л. Основной природный привнос Zn в твердом осадке снегового покрова поступает от почвенной пыли, со скальных поверхностей глинистых пород, песчаников, карбонатных и глинистых сланцев, которые переносятся на большие расстояния под дей-

ствием сильных ветров и конвективных процессов [23, 24].

В промышленной зоне г. Усолье-Сибирское в твердой фазе снегового покрова концентрации Hg превышают фоновые значения в 32 раза и достигают 0,8 мг/кг. Отчетливо наблюдается шлейф высоких концентраций Hg от места цеха ртутного электролиза в направлении к р. Ангаре. До закрытия основного предприятия УХП (2008 г.) концентрации Hg в твердом осадке снегового покрова составляли 33,4 мг/кг. А за весь период исследования с 2008 по 2020 гг. наблюдается снижение концентрации Hg в твердом осадке снегового покрова от 0,8 (2008 г.) до 0,4 мг/кг (2019 г.). В городской зоне концентрации Hg снижаются до 0,3 мг/кг, но тем не менее это выше фона на 0,02 мг/кг. Ртуть, обладающая широким спектром токсического воздействия на все живые организмы, признана чрезвычайно опасным загрязнителем окружающей среды.

Другим источником поступления Hg в атмосферу служат выбросы сжигания угля [25]. Очень часто наблюдается обогащение твердых аэрозолей Hg по сравнению с ее концентрациями в исходном топливе, причем чем меньше размеры частиц твердых аэрозолей, тем интенсивнее обогащение их Hg. Ртуть содержащие аэрозоли установлены в продуктах сгорания, например, практически во всех стационарных источниках энергии США, на которых в качестве топлива используется уголь. Уровни содержания Hg в твердом аэрозоле варьируются в пределах 0,05–0,55 мг/кг [25–29].

Наиболее высокий уровень содержания Pb в твердом осадке снегового покрова обнаружен в промышленной зоне города (145±39 мг/кг) в непосредственной близости к шламонакопителю УХП. Содержание Pb в твердом осадке снегового покрова на фоновой территории составило 44 мг/кг. Очевидно, что геохимические аномалии Pb, выявленные в пределах промышленной зоны, в значительной мере обусловлены наличием на территории шламонакопителя и работой автотранспорта [30].

Распределение V в твердом осадке снегового покрова г. Усолье-Сибирское показывает, что его основная масса равномерно рассеивается по центральной части города. Результаты анализа показали, что в центре города в твердом осадке снегового покрова содержания V в среднем составляют 150–250 мг/кг, а на и окраинах города снижаются до 77 мг/кг. Такое распределение, возможно, связано с особенностями распределение воздушного потока в условиях города. В результате возникают местные конвективные восходящие и нисходящие потоки. Наиболее теплой является центральная часть города. Повышение температуры здесь вызывает подъем теплого воздуха, на смену которому с окраин втягивается более прохладный. Это приводит к загрязнению центральности части города, где застройка плотная, скорость ветра меньше, чем на окраинах [31]. Загрязнение атмосферы V происходит при сжигании твердого и жидкого топлива [32]. В качестве топлива на ТЭЦ-11 используют уголь и мазут. Уголь содержит в себе незначительные концентрации V и его соединений в качестве

включений, которые при сжигании вместе с золой попадают в атмосферный воздух. Расход мазута зависит от качества угля, его применяют для обеспечения непрерывного процесса горения. По данным [33] в состав мазутной золы входит до 43 % оксида ванадия  $V_2O_5$ .

Наибольший уровень содержания U (до 18 мг/кг) в твердом осадке снегового покрова г. Усолье-Сибирское зафиксирован на территории промышленной зоны (рис. 2). Распределение Th (до 43 мг/кг) в снеговом покрове города фактически аналогично картине распределения U: максимальные значения радионуклида отмечаются также на территории промышленной зоны. Превышения концентрации U по сравнению с природным фоном – 6 раз, Th – 3 раза. Результаты исследований [34] показали, что уголь и зола Забитуйского месторождения обогащены радиоактивными элементами.

Площадь загрязнения снегового покрова изучаемой территории As составляет более 60 %. Наиболее высокие его концентрации установлены на территории промышленной зоны и изменились от 28 до 52 мг/кг. В твердом осадке снегового покрова, отобранного вблизи ТЭЦ, концентрация As выше в 5 раз, чем в пробах с территории фонового района. Угли содержат 2,9 мг/кг As в форме арсенопирита, или примеси пирита. В процессе сжигания углей As переходит в газообразную форму или может находиться в виде частиц аэрозоля субмикронного размера. В процессе взаимодействия As с Ca образуется порошковое соединение арсенат кальция. При сжигании углей также образуются такие соединения, как  $As_2O_3$  и арсенаты железа [35].

Одним из главных показателей загрязнения снегового покрова является коэффициент концентрации элементов (Кс). Исходя из полученного набора Кс элементов, поступающих в атмосферу с пылегазовыми выбросами расположенных на данных территориях предприятий, можно выстроить следующий ряд ранжирования по убыванию: Hg (30) > Cu (5,3) > U (4,6) > V (3,8) > As (3,7) > Co (3,5) > Pb (3,2) > Cd (2,7) > Th (2,7) > Ni (2,4) > Mn (2,2) > Fe (2) > Zn (1). Формирование данной группы элементов связано с влиянием заброшенной промплощадки УХП, в поч-

вогрунтах и шламонакопителе которой сосредоточены большие объемы промышленных отходов, представляющих серьезную угрозу для экологического благополучия всей окружающей среды Прибайкалья.

При исследовании твердого осадка снегового покрова территории г. Усолье-Сибирское большое значение имеет полиэлементный состав проб, который характеризуется с помощью суммарного показателя загрязнения (Zc) (табл. 1).

Распределение суммарного показателя загрязнения снегового покрова закономерное: для промышленной зоны г. Усолье-Сибирское значения показателя соответствуют высокой (128–256) степени загрязнения [36]. Наибольший вклад в суммарный показатель загрязнения вносят Hg, As, Pb, Zn, Fe. Расчет суммарного показателя загрязнения на селитебной территории г. Усолье-Сибирское соответствует средней (64–128) степени загрязнения.

С помощью показателя Zc, без проведения предварительной корреляционной оценки довольно сложно оценить, к какому источнику загрязнения относится та или иная группа элементов. Благодаря корреляционному анализу удалось показать ассоциации элементов, характерных для различных источников загрязнения, функционирующих на исследуемой территории.

Корреляционный анализ микроэлементного состава (рис. 2, Кластер R) показал, что концентрации V, U, Th, Cu, As тесно взаимосвязаны ( $r=0,88-1$ ). Это указывает на общий источник их поступления. Заметно меньшую корреляционную связь имеют Co, Cd, Ni, Zn, Pb ( $r=0,2-0,4$ ), в то время как содержание Fe, Mn и Hg, стоящих в кластере отдельно от остальной группы элементов, не имеет выраженной взаимосвязи с другими группами элементов ( $r=0,2-0,4$ ). В твердом осадке снегового покрова г. Усолье-Сибирское по результатам кластерного анализа наблюдается тесная взаимосвязь между пробами (рис. 2, Кластер Q). Таким образом, сформировались три основные группы. Все это указывает на выраженную специфичность поступления потенциально токсичных элементов в атмосферный воздух города с разными типами производств.

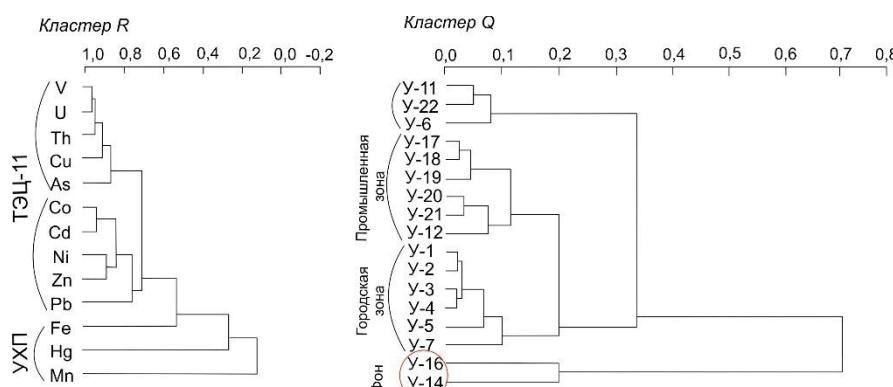
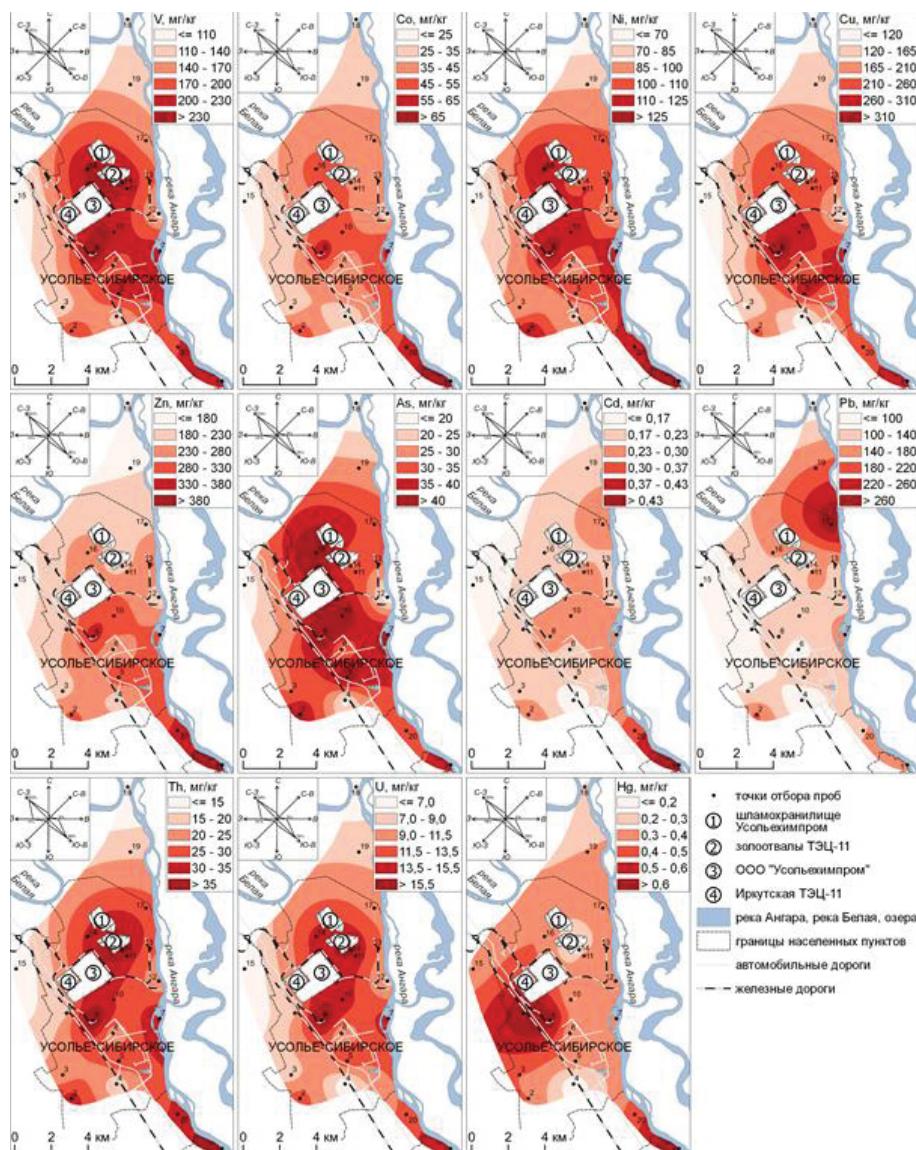


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа химического состава твердого осадка снегового покрова г. Усолье-Сибирское

Fig. 2. Dendrogram of cluster analysis of the chemical composition of solid sediment in snow cover of Usoleye-Sibirskoe



**Рис. 3. Карты распределения микроэлементов в твердом осадке снежного покрова г. Усолье-Сибирское (мг/кг)**  
**Fig. 3. Maps of distribution of trace elements in solid sediment of snow cover of Usolye-Sibirskoe (mg/kg)**

## Минеральный состав твердого осадка

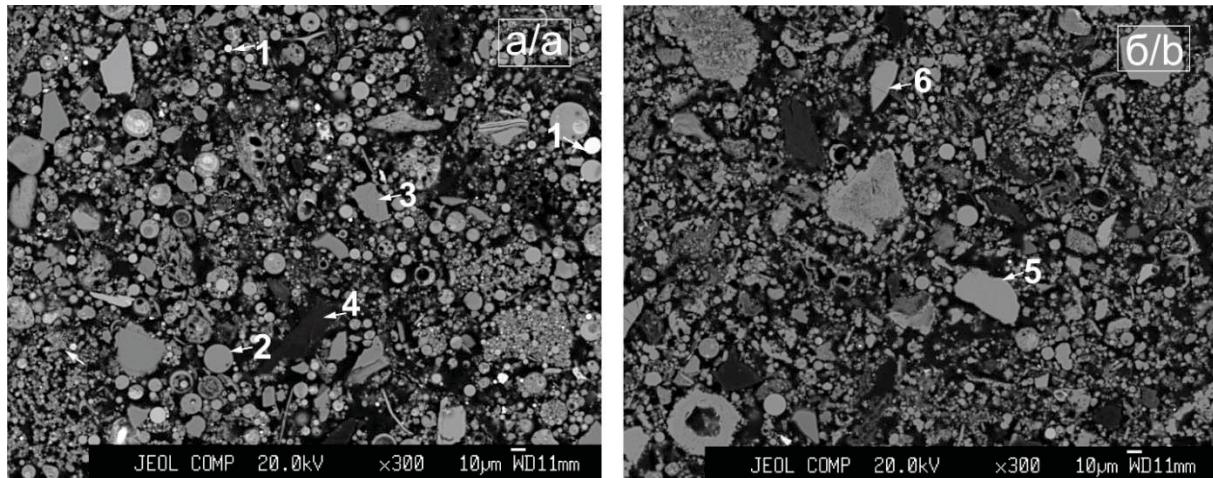
По результатам исследования минерального состава методом РСМА твердый осадок представляет собой смесь частиц и их конгломератов различной формы, цвета и размеров. Наибольшее количество частиц мелкодисперсной фракции (от 1–10 мкм) обнаружено в пробе, отобранный вблизи промзоны города, причем их доля по объему составляет 30 % пробы (рис. 3). Количество частиц мелкодисперсной фракции гораздо меньше на территории города, но они тоже присутствуют. На территории фонового участка частиц с размером менее 10 мкм практически не обнаружено, преобладают частицы размером от 10 до 50 мкм (их объёмная доля 70 %). Это говорит о том, что в такой пробе очень много частиц природного происхождения. Источниками таких частиц являются обнажённые почвы, скальные образования (рис. 5).

С помощью метода РСМА в твердом осадке снеговых проб, отобранных на территории г. Усолье-

Сибирское и п. Листвянка, были идентифицированы следующие типы техногенных частиц

Металлические сферулы (рис. 4, *a*). Это частицы круглой формы с металлическим блеском черного, темно-серого цвета. Состав их преимущественно железистый, диаметр составляет от 0,5 до 10 мкм. На территории промзоны и ТЭЦ г. Усолье-Сибирское была обнаружена большая часть частиц круглой формы – металлические сферулы. Рядом авторов показано их техногенное происхождение [37].

Металлические сферулы являются составляющими компонентами золы уноса тепловых электростанций, которые работают на угле. Сферулы образуются в высокотемпературных процессах. Подробный механизм происхождения сферул рассмотрен в работах Л.Я. Кизильштейна [38, 39]. Округлые частицы могут легко переносится с воздушными потоками на большие расстояния, так, например, такие частицы обнаружены в удаленном от промышленных зон районе – атмосфере Арктики [40].



**Рис. 4.** Вид твердого осадка снегового покрова, отобранного на промышленной зоне г. Усолье-Сибирское (а) и в районе городской зоны (б). Изображение в обратно рассеянных электронах. Увеличение 300×. 1 – металлические сферулы ( $3Al_2O_3\cdot 2SiO_2$  с примесями Fe, Ti), 2 – алюмосиликатные микросферулы, муллит ( $Fe_2O_3$ ), 3 – кальцит и доломит ( $CaCO_3$ ,  $CaMgCO_3$ ), 4 – сажистая фаза, уголь (C), 5 – кварц ( $SiO_4$ )

**Fig. 4.** Type of solid snow cover sediment sampled in the industrial zone of Usolye-Sibirskoe (a) and in the area of the urban zone (b). Image in backscattered electrons. Magnification 300×. 1 – metallic spherules ( $3Al_2O_3\cdot 2SiO_2$  with Fe, Ti impurities), 2 – aluminosilicate microspherules, mullite ( $Fe_2O_3$ ), 3 – calcite and dolomite ( $CaCO_3$ ,  $CaMgCO_3$ ), 4 – carbon black, coal (C), 5 – quartz ( $SiO_4$ )

Сферические частицы белого цвета – муллит (рис. 4, а). Диаметр частиц от 5 до 15 мкм. Их основа Si и Al с небольшим содержанием Fe, Ti, Ca и других элементов. Муллит является важным компонентом искусственных техногенных продуктов. Образуется при нагревании каолинита, глинозема, кокса до 950 °C. Сферические частицы муллита явно техногенного происхождения. Вероятнее всего, источником поступления таких частиц на территории г. Усолье-Сибирское, являются выбросы ТЭЦ-11, а также предприятия металлообработки.

Частицы сажи и угля – это частицы черного цвета, плоской формы (рис. 4, а). Состав частиц углеродный. Размер частиц изменяется от 3 до 40 мкм. Присутствие таких частиц в пробе является характерным признаком наличия вблизи ТЭЦ.

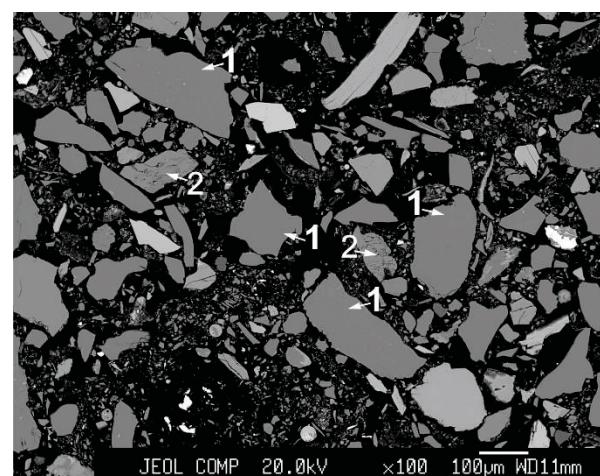
Частицы природного происхождения:

Кварц – серые, светло-серые частицы, не окатанные, размером от 2 до 25 мкм (рис. 4, б; рис. 5), присутствуют в большом количестве в пробах, отобранных в фоновых районах. Кварц ( $SiO_4$ ) входит в состав силикатов. Крупные зерна кварца, как правило, имеют матовую поверхность, не окатанные, что свидетельствует об их эоловой обработке, т. е. материал, принесенный ветровым потоком.

Мусковит – среднего размера частицы (рис. 5) ( $KAl_2[AlSi_3O_10][OH]_2$ ), калиевая слюда. В составе мусковита K находится в соотношении 11,8 %, Al – 39 %, Si – 45,2 %, а  $H_2O$  – 4,5 %. Частицы отличаются своей слоистой структурой, которая больше похожа на чешуйки либо на листовую пластины разной формы и размера.

Кальциты и доломиты ( $CaCO_3$ ,  $CaMg(CO_3)_2$ ) (рис. 4, б) – частицы серого цвета, огранненной формы, размеры до 20 мкм. Необходимо отметить, что в образце, взятом на промплощадке г. Усолье-Сибирское,

выделяется достаточно много кальцита. Кальцит и доломит содержатся в карбонатных породах, которые слагают данную местность. Также на территории города находятся карьеры со щебнем.



**Рис. 5.** Вид твердого осадка снегового покрова, отобранного на территории фонового участка (п. Листяняка, оз. Байкал). Изображение в обратно рассеянных электронах. Увеличение 60×. 1 – кварц ( $SiO_2$ ), 2 – мусковит ( $KAl_2[AlSi_3O_10][OH]_2$ )

**Fig. 5.** View of the solid sediment of snow cover selected on the territory of the background area (Listyanka village, Lake Baikal). Image in backscattered electrons. Magnification 60×. 1 – quartz ( $SiO_2$ ), 2 – muscovite ( $KAl_2[AlSi_3O_10][OH]_2$ )

Минерально-вещественный состав твердого осадка снегового покрова различных по техногенной нагрузке зон отбора проб приведен в табл. 2.

**Таблица 2. Минерально-вещественный состав твердого осадка снегового покрова г. Усолье-Сибирское**  
**Table 2. Mineral and material composition of solid sediment of snow cover of Usolye-Sibirskoe**

Зоны Zones	Минерал, частица Mineral, particle	Агрегат Unit	Химическая формула, состав Chemical formula, composition	Генезис Genesis
Фон, Городская зона Background, Urban area	Кварц/Quartz	Идиоморфные частицы Idiomorphic particles	SiO <sub>4</sub>	Природный Natural
	Полевой шпат/Feldspar	Призмы/Prisms	Na[Al <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]-Ca[Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ]	
	Слоистые алюмосиликаты (мусковит, биотит) Layered aluminosilicates (muscovite, biotite)	Пластины и чешуйки Plates and scales	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> [Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> ][OH,F] <sub>2</sub> и др.	
	Кальцит, доломит Calcite, dolomite	Призмы, пластины Prisms, plates	CaCO <sub>3</sub> , CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	
	Сульфаты/Sulfates	Мелкие кристаллы Small crystals	[SO] <sup>2-</sup> <sub>4</sub>	
Промышленная зона Industrial zone	Муллит/Mullit	Сферулы белого цвета White spherules	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> примесями Fe, Ti (Fe, Mg)·Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Техноген- ный Technogenic
	Гематит/Hematite	Сферулы черного, серого цвета Black, gray spherules	(Fe, Mg)·Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	
	Сажистая фаза/Soot	Чешуйки/Scales	C	

### Заключение

Проведено комплексное изучение твердого осадка снегового покрова различных функциональных зон г. Усолье-Сибирское для определения источников поступления и миграционных путей химических элементов техногенного происхождения. Основными источниками загрязнения территории г. Усолье-Сибирское являются предприятие УХП и ТЭЦ. Наиболее контрастные аномалии в промышленной зоне города образуют Hg, Cu, V, As. Особая опасность заключается в том, что высокотоксичные элементы с атмосферным переносом поступают на территорию г. Усолье-Сибирское и в акватории рек Белая и Ангара, которые используются жителями региона как основные источники питьевого и рыбохозяйственного назначения. Величина Zc ряда элементов (V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Th, U, Hg) в твердой фазе снегового покрова свидетельствует о высокой степени загрязнения атмосферы промышленной зоны г. Усолье-Сибирское. Применение корреляционного анализа позволило выявить ассоциации элементов, характерных для представленных источников загрязнения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Contaminant emissions as indicators of chemical elements in the snow along a latitudinal gradient in southern Andes / J. Pizarro, P. Vergara, S. Cerdá, R.R. Cordero, X. Castillo, P. Rowe, G. Casassa, J. Carrasco, A. Damiani, P. Llanillo, F. Lambert, R. Rondanelli, N. Huneeus, F. Fernando, J. Alfonso, S. Neshyba // Scientific Reports. – 2021. – № 14530. – P. 1–10.
2. Trace element distribution in the snow cover of different functional zones in Bereziniki-Solikamsk industrial hub, Russia / E. Ushakova, E. Menshikov, T. Karavaeva, A. Puzik // Journal of Ecological Engineering. – 2021. – № 22 (10). – P. 28–39.
3. Magnetite pollution nanoparticles in the human brain / B.A. Maher, I.A.M. Ahmed, V. Karloukovski, D.A. MacLaren, P.G. Foulds, D. Allsop, L. Calderon-Garcidueñas // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – V. 113 (39). – P. 10797–10801.
4. Mazidi M., Speakman J.R. Ambient particulate air pollution (PM2.5) is associated with the ratio of type 2 diabetes to obesity // Scientific Reports. – 2017. – V. 7 (1). – P. 1–7.
5. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the global burden of diseases study 2015 / A.J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett, H.R. Anderson, J. Frostad, K. Estep, M.H. Forouzanfar // Lancet. – 2017. – № 389 (10082). – P. 1907–1918.
6. Трифонов К.И., Девисилов В.А. Физико-химические процессы в техносфере. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2007. – 240 с.
7. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Академия, 2003. – 400 с.
8. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change / R.A. Silva, J. West, Y. Zhang, S. Anenberg, J.-F. Lamarque, D. Shindell, W. Collins, S. Dalsoren, G. Faluvegi, G.A. Folberth, L.W. Horowitz, T. Nagashima, V. Naik, S. Rumbold, R.B. Skeie, K. Sudo, T. Takemura, D. Bergmann, Ph. Cameron-Smith, I. Cionni, R.M. Doherty, V. Eyring, B. Josse, I.A. MacKenzie, D. Plummer, M. Righi, D. Stevenson, S. Strode, S. Szopa, G. Zeng // Environmental Research Letters – 2013. – V. 8. – № 3. – P. 1–11.
9. Correlation of natural and technogenic mercury sources in the Baikal polygon / P.V. Koval, G.V. Kalmychko, V.F. Geletya, G.A. Leonova, V.I. Medvedev, L.D. Andrusaitis // Journal of Geochemical Exploration. – 1999. – V. 66. – P. 277–289.
10. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме братского водохранилища / П.В. Коваль, Г.В. Калмычков, С.М. Лав-

Проведенный минерально-вещественный анализ твердого осадка снегового покрова на промышленной территории г. Усолье-Сибирское позволил установить четкие признаки техногенной нагрузки. Основная доля техногенного материала представлена в виде муллита, сажистых частиц и гематита. Природная составляющая твердого осадка снегового покрова исследуемой территории представлена в основном частицами кварца, полевым шпатом, мусковитом, биотитом.

Полученные результаты исследования минерально-вещественного состава твердого осадка снегового покрова различных зон г. Усолье-Сибирское могут быть использованы для прогнозирования техногенного воздействия на окружающую среду, совершенствования методов экологического мониторинга, решения задач численного моделирования процессов переноса твердого осадка на локальном и региональном уровнях, а также для изучения оценки риска здоровью населения.

Статья была выполнена в соответствии с Государственным заданием Института геохимии им. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (проект № 0284-2021-0003).

- ров, Ю.Н. Удодов, Е.В. Бутаков, Ф.В. Файфилд, В.И. Алиева // Доклады Академии наук. – 2003. – Т. 388. – № 2. – С. 225–227.
11. Разработка технологии очистки поверхностного стока предприятия «Усольхимпром» (Южное Прибайкалье) / Е.А. Руш, П.В. Коваль, Ю.Н. Удодов, Г.П. Королева, А.Е. Гапон, Л.Д. Андралайтис // Инженерная экология. – 2007. – № 5. – С. 3–15.
12. Особенности техногенного загрязнения и формы переноса ртути в Братском водохранилище / В.И. Алиева, Е.В. Бутаков, М.В. Пастухов, Л.Д. Андралайтис // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2011. – № 5. – С. 431–438.
13. Gordeeva O.N., Belogolova G.A., Pastukhov M.V. Mercury speciation and mobility in soils of industrial areas in the Baikal region, southern Siberia // Environmental Earth Sciences. – 2017. – V. 76. – № 16. – P. 1–10.
14. Song F., Gao Y. Size distributions of trace elements associated with ambient particulate matter in the affinity of a major highway in the New Jersey–New York metropolitan area // Atmospheric environment. – 2011. – V. 45. – P. 6714–6723.
15. World Health Organization. Burden of Disease from Ambient Air Pollution for 2012 –Summary of Results. – Geneva, Switzerland: WHO, 2014. – 30 p.
16. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city / E. Konstantinova, T. Minkina, A. Konstantinov, S. Sushkova, E. Antonenko, A. Kurasova, S. Loiko // Environmental Geochemistry and Health. – 2020. – V. 44. – № 2. – P. 409–432.
17. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 182 с.
18. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве / Б.А. Ревич, Ю.Е. Саэт, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 8 с.
19. Эколого-геохимическая оценка аэробиогенного загрязнения урбанизированной территории по состоянию снежного покрова / Н.Г. Куимова, А.Г. Сергеева, Л.П. Шумилова, Л.М. Павлова, И.Г. Борисова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2012. – № 5. – С. 422–435.
20. Тяжелые металлы в воздухе и снежном покрове Улан-Батора / О.И. Сорокина, Н.Е. Кошелева, Н.С. Касимов, Д.Л. Голованов, С.Н. Бажа, Д. Доржготов, С. Энх-амгалан // География и природные ресурсы. – 2013. – № 3. – С. 159–170.
21. Семенец Е.С., Свистов В.П., Тапаш А.С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 27–36.
22. Role of snow in the fate of gaseous and particulate exhaust pollutants from gasoline-powered vehicles / Y. Nazarenko, S. Fournier, U. Kurien, R.B. Rangel-Alvarado, O. Nepotchatykh, P. Seers, P.A. Ariya // Environmental Pollution. – 2017. – V. 223. – P. 665–675.
23. Романовская А.Ю., Савин И.Ю. Аэрозольная пыль почвенно-го происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2021. – Вып. 109. – С. 36–95.
24. Атмосферныезвези Петропавловска-Камчатского по данным загрязнения снежного покрова: экологический анализ / К.С. Голохваст, В.В. Жаков, П.А. Никифоров, В.В. Чайка, Т.Ю. Романова, А.А. Карабцов // БЮЛЛЕТЕНЬ. – 2014. – Вып. 53. – С. 89–94.
25. Jenny A., Fisher F., Nelson P. Atmospheric mercury in Australia: recent findings and future research needs Recent findings and future research needs // Element Science Anthropocene. – 2020. – V. 3 – P. 11623–11636.
26. Tracing the transboundary transport of mercury to the tibetan plateau using atmospheric mercury isotopes / Ben Yu, Lin Yang, Hongwei Liu, Cailing Xiao, Duo Bu, Qiangying Zhang Jianjie Fu, Qianggong Zhang, Zhiyuan Cong, Yong Liang, Ligang Hu Yongguang Yin, Jianbo Shi, and Guibin Jiang // Environmental Science & Technology. – 2022. – № 56, 3. – P. 1568–1577.
27. Improved mechanistic model of the atmospheric redox chemistry of mercury / V. Shah, D.J. Jacob, C.P. Thackray, Xuan Wang, E.M. Sunderland, Th.S. Dibble, A. Saiz-Lopez, I. Černusák, V. Kellö, P.J. Castro, R. Wu, Ch. Wang // Environmental Science & Technology. – 2021. – V. 55 (21). – P. 14445–14456.
28. Chemical and mineral characteristics of melted snow-water in the Jilin Province, North-East China / X. Zhao, X. Guo, Y. Mao, H. Yan, M. Li, L. Zhao // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2016. – V. 6. – P. 1–9.
29. Characteristic contaminants in snowpack and snowmelt surface runoff from different functional areas in Beijing, China / D. Yuan, Y. Liu, X. Guo, J. Liu // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – 25. – P. 36256–36266.
30. Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity / O. Ramirez, A.M. Sánchez de la Campa, F. Amato, T. Moreno, L.F. Silva, J.D. de la Rosa // Science of The Total Environment. – 2019. – 652. – P. 434–446.
31. Ukraintseva A.V., Plyusnina A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 122. – P. 15–25.
32. Иваницкий М.С. Анализ влияния характеристик и условий сжигания мазутных топлив на выход пентаоксида ванадия // Вестник МЭИ. Энергетика. – 2017. – № 1. – С. 20–24.
33. Микроэлементы в углях восточной Сибири / Н.Г. Вязова, Л.П. Шаулина, А.Ф. Шмидт, Л.М. Димова // Химия твердого топлива. – 2016. – № 5. – С. 45–55.
34. Арбузов С.И. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: ИД «Д-Принт», 2007. – 468 с.
35. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Загрязнение территории Челябинска и его окрестностей мышьяком при сжигании угля // Химия твердого топлива. – 2011. – № 3. – С. 58–60.
36. Ломоносов И.С., Макаров В.Н., Хаустов А.П. Экогохимия городов Восточной Сибири. – Якутск: Изд-во СО РАН, Ин-т мерзлотоведения, 1993. – 107 с.
37. Mercury pollution In snow cover around thermal power plants in cities (Omsk, Kemerovo, Tomsk Regions, Russia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, N.A. Osipova, E.E. Lyapina, V.V. Litay, G. Metreveli, J. Kim // Geography, Environment, Sustainability. – 2019. – № 12. – P. 132–147.
38. Кизильштейн Л.Я., Левченко С.В. Элементы-примеси и экологические проблемы угольной энергетики // Теплоэнергетика. – 2003. – № 12. – С. 14–19.
39. Кизильштейн Л.Я. Элементы-примеси в дымовых выбросах угольных ТЭС Энергия: экономика, техника, экология. – 2017. – № 6. – С. 32–36.
40. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики / В.П. Шевченко, А.П. Лисицын, Р.Р. Штайн (Stein), Н.В. Горюнова, А.А. Клювкин, М.Д. Кравчишина, М. Кривс (Kriwes), А.Н. Новигатский, В.Т. Соколов, А.С. Филиппов, Х.С. Хаас (Haas) // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 1. – (75). – С. 106–118.

Поступила 15.06.2022 г.

## Информация об авторах

**Холодова М.С.**, младший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН.

**Пастухов М.В.**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН.

**Бычинский В.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН.

**Просекин С.Н.**, младший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН; младший научный сотрудник Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Белозерова О.Ю.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН.

UDC 504.3.054

## MINERAL AND MATERIAL COMPOSITION OF SOLID SEDIMENT OF SNOW COVER IN VARIOUS FUNCTIONAL ZONES OF USOLYE-SIBIRSKOE

**Marina S. Kholodova<sup>1</sup>,**  
akimova@igc.irk.ru

**Mikhail V. Pastukhov<sup>1</sup>,**  
mpast@igc.irk.ru

**Valery A. Bychinsky<sup>1</sup>,**  
val@igc.irk.ru

**Sergey N. Prosekin<sup>1,2</sup>,**  
pros.sergey@igc.irk.ru

**Olga Yu. Belozerova<sup>1</sup>,**  
obel@igc.irk.ru

<sup>1</sup> Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,  
1A, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russia.

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

**The relevance** of studying chemical composition of solid sediment in snow cover of Usolye-Sibirskoe was predetermined by the data of the Ministry of Natural Resources of Russia, given in the State Report «On the State and Environmental Protection of the Russian Federation», which show a significant deterioration of the environmental situation in the period from 2012 to 2017. In 2020 Irkutsk Region took the third place among the regions of Siberia in terms of industrial emissions into the atmosphere. Five of the most polluted cities – Bratsk, Zima, Cherkemhovo, Usolye-Sibirskoe and Shelekhov – were noted, in which, despite more modern treatment facilities currently used, pollution indicators increased compared. The work is particularly relevant due to the fact that Lake Baikal – a unique natural object classified as a World Heritage Site – is located at a distance of only 120 km from the research area. The Angara River flowing from the lake Baikal, the main source of drinking water for the population of coastal cities, flows in close proximity to industrial production areas.

**Objective:** assessment of the ecological state of the air in Usolye-Sibirskoe based on the results of snow-geochemical monitoring and geoinformation mapping.

**Objects:** solid sediment of snow cover in Usolye-Sibirskoe, Irkutsk region.

**Methods.** Chemical composition of the solid sediment of the snow cover was determined by the ISP-MS method, mercury was analyzed by atomic absorption on the RA-915+ spectrometer, and the mineral composition of the solid snow sediment was determined by X-ray spectral electron probe microanalysis.

**Results.** The paper presents the results of studies of mineral and microelement compositions of solid sediment of snow cover in the functional zones of Usolye-Sibirskoe. Chemical elements and minerals – markers of technogenic sources of pollution – have been identified. With the help of GIS, mapping was performed, the results of which helped to identify halos with a weak, medium and strong degree of contamination.

### Key words:

Pollution, trace elements, mineral composition, snow cover, industrial zone, background area, Usolye-Sibirskoe.

The research was carried out according to the State assignment of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (project no. 0284-2021-0003).

### REFERENCES

1. Pizarro J., Vergara P., Cerdá S., Cordero R.R., Castillo X., Rowe P.M., Casassa G., Carrasco J., Damiani A., Llanillo P., Lambert F., Rondanelli R., Huneeus N., Fernando F., Alfonso J., Neshyba S. Contaminant emissions as indicators of chemical elements in the snow along a latitudinal gradient in southern Andes. *Scientific Reports*, 2021, no. 14530, pp. 1–10.
2. Ushakova E., Menshikov E., Karavaeva T., Puzik A. Trace element distribution in the snow cover of different functional zones in Berezniki-Solikamsk Industrial Hub, Russia. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, no. 22 (10), pp. 28–39.
3. Maher B.A., Ahmed I.A.M., Karloukovski V., MacLaren D.A., Foulds P.G., Allsop D., Calderon-Garcidueñas L. Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, vol. 113 (39), pp. 10797–10801.
4. Mazidi M., Speakman J.R. Ambient particulate air pollution (PM2.5) is associated with the ratio of type 2 diabetes to obesity. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7 (1), pp. 1–7.
5. Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K., Forouzanfar M.H. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the global burden of diseases study 2015. *Lancet*, 2017, no. 389 (10082), pp. 1907–1918.
6. Trifonov K.I., Devivilov V.A. *Fiziko-khimicheskie protsessy v tekhnosfere* [Physico-chemical processes in the technosphere]. Moscow, Forum: INFRA-M Publ., 2007. 240 p.
7. Dobrovolskiy V.V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 400 p.
8. Silva R.A., West J., Zhang Y., Anenberg S., Lamarque J-F., Collins W.J., Dalsoren S.B., Faluvegi G., Folberth G.A., Horowitz L.W., Nagashima T., Naik V., Rumbold S., Skeie R.B.,

- Sudo K., Takemura T., Bergmann D., Cameron-Smith Ph., Cionni I., Doherty R.M., Eyring V., Josse B., MacKenzie I.A., Plummer D., Righi M., Stevenson D., Strode S., Szopa S., Zeng G. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change, *Environmental Research Letters*, 2013, no. 8, pp. 1–11.
9. Koval P.V., Kalmychko G.V., Geletya V.F., Leonova G.A., Medvedev V.I., Andrulaitis L.D. Correlation of natural and technogenic mercury sources in the Baikal polygon. *Russia Journal of Geochemical Exploration*, 1999, vol. 66, pp. 277–289.
10. Koval P.V., Kalmychkov G.V., Lavrov S.M., Udomov Yu.N., Butakov E.V., Fajfild F.V., Alieva V.I. Anthropogenic component and mercury balance in the ecosystem of the Bratsk reservoir. *Reports of the Academy of Sciences*, 2003, vol. 388, no. 2, pp. 225–227. In Rus.
11. Rush E.A., Koval P.V., Udomov Yu.N., Koroleva G.P., Gapon A.E., Andrulaitis L.D. Razrabotka tekhnologii ochistki poverkhnostnogo stoka predpriyatiya «Usolekhimprom» (Yuzhnoe Pribaykale) [Development of surface runoff treatment technology of the Usolekhimprom enterprise (Southern Baikal region)]. *Indzherennaya ekologiya*, 2007, no. 5, pp. 3–10.
12. Alieva B.I., Butakov E.V., Pastuhov M.V., Andrulaitis L.D. Features of technogenic pollution and forms of mercury transfer in the Bratsk reservoir. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2011, no. 5, pp. 431–438. In Rus.
13. Gordeeva O.N., Belogolova G.A., Pastukhov M.V. Mercury speciation and mobility in soils of industrial areas in the Baikal region, southern Siberia. *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, no. 16, pp. 1–10.
14. Song F., Gao Y. Size distributions of trace elements associated with ambient particulate matter in the affinity of a major highway in the New Jersey–New York metropolitan area. *Atmospheric environment*, 2011, vol. 45, pp. 6714–6723.
15. World Health Organization. *Burden of Disease from Ambient Air Pollution for 2012 – Summary of Results*. Geneva, Switzerland, WHO, 2014. 30 p.
16. Konstantinova E., Minkina T., Konstantinov A., Sushkova S., Antonenko E., Kurasova A., Loiko S. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 409–432.
17. Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman S.H. *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 182 p.
18. *Metodicheskie rekomendatsii po otsevke stepeni zagryazneniya atmosfernogo vozdukhya naselennykh punktov metallami po ikh soderzhaniyu v snezhnom pokrove i pochve* [Methodological recommendations for assessing the degree of atmospheric air pollution of settlements with metals based on their content in snow cover and soil] Eds. B.A. Revich, Yu.E. Saet, R.S. Smirnova, E.P. Sorokina Moscow, IMGRE Publ., 1990. 8 p.
19. Kuimova N.G., Sergeeva A.G., Shumilova L.P., Pavlova L.M., Borisova I.G. Ecological and geochemical assessment of aerotechnogenic pollution of urbanized territory according to the state of snow cover. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2012, no. 5, pp. 422–435. In Rus.
20. Sorokina O.I., Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Golovanov D.L., Bazha S.N., Dorzhgotov D., Enh-amgalan S. Heavy metals in the air and snow cover of Ulaanbaatar. *Geography and natural resources*, 2013, no. 3, pp. 159–170. In Rus.
21. Semenets E.S., Svitov V.P., Tapash A.S. Chemical composition of atmospheric precipitation of the Russian Arctic. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 27–36. In Rus.
22. Nazarenko Y., Fournier S., Kurien U., Rangel-Alvarado R.B., Nepotchatykh O., Seers P., Ariya P.A. Role of snow in the fate of gaseous and particulate exhaust pollutants from gasoline-powered vehicles. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 223, pp. 665–675.
23. Romanovskaya A.Yu., Savin I.Yu. Aerosol dust of soil origin in the atmosphere: sources, quantity, properties (overview). *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*, 2021, vol. 109, pp. 36–95. In Rus.
24. Golohvast K.S., Zhakov V.V., Nikiforov P.A., Chayka V.V., Romanova T.Yu., Karabtsov A.A. Atmospheric suspensions of Petropavlovsk-Kamchatsky according to the data of snow cover pollution: ecological analysis. *BULLETIN*, 2014, vol. 53, pp. 89–94. In Rus.
25. Jenny A., Fisher F., Nelson P. Atmospheric mercury in Australia: recent findings and future research needs Recent findings and future research needs. *Element Science Anthropocene*, 2020, vol. 3, pp. 11623–11636.
26. Ben Yu, Lin Yang, Hongwei Liu, Cailing Xiao, Duo Bu, Qiangying Zhang Jianjie Fu, Qianggong Zhang, Zhiyuan Cong, Yong Liang, Ligang Hu Yongguang Yin, Jianbo Shi, and Guibin Jiang. Tracing the transboundary transport of mercury to the Tibetan Plateau using atmospheric mercury isotopes. *Environmental Science & Technology*, 2022, no. 56, 3, pp. 1568–1577.
27. Shah V., Jacob D.J., Thackray C.P., Wang X., Sunderland E.M., Dibble Th.S., Saiz-Lopez A., Černusák I., Kellö V., Castro P.J., Wu R., Wang Ch. Improved mechanistic model of the atmospheric redox chemistry of mercury. *Environmental Science & Technology*, 2021, vol. 55 (21), pp. 14445–14456.
28. Zhao X., Guo X., Mao Y., Yan H., Li M., Zhao L. Chemical and mineral characteristics of melted snow-water in the Jilin Province, North-East China. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, vol. 6, pp. 1–9.
29. Yuan D., Liu Y., Guo X., Liu J. Characteristic contaminants in snowpack and snowmelt surface runoff from different functional areas in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25, pp. 36256–36266.
30. Ramírez O., Sánchez de la Campa A.M., Amato F., Moreno T., Silva L.F., De la J.D. Rosa Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 652, pp. 434–446.
31. Ukrainstseva A.V., Plyusnina A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 122, pp. 15–25.
32. Ivanickiy M.S. Analysis of the influence of the characteristics and conditions of fuel oil combustion on the yield of vanadium pentoxide. *Vestnik MEI Energetika*, 2017, no. 1, pp. 20–24. In Rus.
33. Vyazova N.G., Shaulina L.P., Shmidt A.F., Dimova L.M. Mikroelementy v uglyakh vostochnoy Sibiri [Trace elements in the coals of Eastern Siberia]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2016, no. 5, pp. 45–55.
34. Arbuzov S.I. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in Siberian coals]. Tomsk, D-Print Publ. house, 2007. 468 p.
35. Galiiulina R.V., Galiiulina R.A. Zagryaznenie territorii Chelyabinskogo okrestnostey myshyakom pri szhiganii uglya [Contamination of the territory of Chelyabinsk and its environs with arsenic during coal burning]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2011, no. 3, pp. 58–60.
36. Lomonosov I. S., Makarov V. N., Khaustov A. P. *Ekogeokhimiya gorodov Vostochnoy Sibiri* [Ecogeochimistry of the cities of Eastern Siberia]. Yakutsk, Publ. SO RAN, Institute of Permafrost Studies, 1993. 107 p.
37. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Osipova N.A., Lyapina E.E., Litay V.V., Metreveli G., Kim J. Mercury pollution in snow cover around thermal power plants in cities (Omsk, Kemerovo, Tomsk Regions, Russia). *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, no. 12, pp. 132–147.
38. Kizilsteeyn L.Y., Levchenko S.V. Elementy-primesi i ekologicheskie problemy ugolnoy energetiki [Impurity elements in the flue emissions of coal-fired thermal power plants]. *Thermal Engineering*, 2003, no. 12, pp. 14–19.
39. Kizilsteeyn L.A. Elementy-primesi v dymovyykh vybrosakh ugolnykh TES [Impurity elements in the flue emissions of coal-fired thermal power plants]. *Energy: economics, technology, ecology*, 2017, no. 6, pp. 32–36.
40. Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Shtayn (Stein) R.R., Goryunova N.V., Klyuyvitkin A.A., Kravchishina M.D., Krievs M. (Krievs), Novigatskiy A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas H.C. (Haas) Distribution and composition of insoluble particles in Arctic snow. *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2007, no. 1 (75), pp. 106–118. In Rus.

Received: 15 June 2022.

**Information about the authors**

*Marina S. Kholodova*, junior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

*Mikhail V. Pastukhov*, Cand. Sc., senior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

*Valery A. Bychinsky*, Cand. Sc., senior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

*Sergey N. Prosekin*, junior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS; junior researcher, Irkutsk National Research Technical University.

*Olga Yu. Belozerova*, Cand. Sc., senior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

**Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова  
Корректура и перевод на английский язык С.В. Жаркова  
Дизайн обложки Т.В. Буланова**

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 28.09.2022. Дата выхода журнала: 30.09.2022.  
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,87. Уч.-изд. л. 24,30.  
Заказ 204-22. Тираж 500 экз. Цена свободная.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.

