



**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Том 334, № 6, 2023  
Издается с 1903 г.**

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

**Volume 334, № 6, 2023  
Published since 1903**



**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

---

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

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 334, № 6, 2023

Издательство  
Томского политехнического университета  
2023

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2023

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геологических объектов.

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



**TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY**

---

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

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

Volume 334, № 6, 2023

Tomsk Polytechnic University Publishing House  
2023

## EDITORIAL BOARD

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

## AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Использование стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования поверхностных водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа  
Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н. 7  
**Stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon when interpreting formation conditions of surface water bodies of Yamalo-Nenets autonomous region**  
Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyrayev A.N.
- Движение волны фильтрации вдоль несвязной поверхности пористого тела  
Таирова А.А., Беляков Г.В., Юдочкин Н.А. 20  
**Filtration wave movement along the non-cohesive surface of a porous body**  
Tairova A.A., Belyakov G.V., Iudochkin N.A.
- Расчет толщины внутренних покрытий оболочек ядерного топлива для аварийно-устойчивых твэлов  
Хамад Халифад Р., Никитенков Н.Н., Кудияров В.Н. 27  
**Calculation of nuclear fuel cladding internal coating thickness for emergency resistant nuclear fuel element**  
Hamad Khalifa R.H., Nikitenkov N.N., Kudiyarov V.N.
- Определение влияния жидкости глушения на снижение фильтрационных характеристик карбонатных горных пород при освоении скважин  
Сентемов А.А., Дорфман М.Б. 35  
**Well-killing fluid influence on decline of permeability during well completion in carbonate reservoirs**  
Sentemov A.A., Dorfman M.B.
- Прогноз востребованности полигонов твердых коммунальных отходов на основе анализа открытых данных ввода в эксплуатацию и объемов вывозки отходов на объекты обращения  
Чилингер Л.Н., Латин О.В. 47  
**Forecast of the demand of solid municipal waste polygons based on the analysis of open data of commissioning and volume of waste removal to disposal facilities**  
Chilinger L.N., Latin O.V.
- Обзор мирового рынка вольфрама. Часть 3. Товарные потоки конечных вольфрамовых продуктов  
Боярко Г.Ю. 57  
**Overview of the global tungsten market. Part 3. Commodity flows of final tungsten products**  
Boyarko G.Yu.
- Особенности осадкообразования и экологический статус промышленного канала сточных вод  
Ушакова Е.С., Белкин П.А., Дробинина Е.В. 75  
**Sewage sludge formation characteristics and environmental status of the industrial wastewater channel**  
Ushakova E.S., Belkin P.A., Drobina E.V.
- Картографирование разрывных нарушений по данным аэрокосмических съемок с целью обеспечения безопасности магистральных трубопроводов (на примере участка Чайво–Де-Кастри)  
Купцова О.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Долгополов Д.В. 92  
**Fault mapping by data of aerospace surveys to ensure the safety of main pipelines (by the example of the section Chayvo–De-Kastri oil pipeline)**  
Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Dolgoplov D.V.
- Современные основы автоматизации управления процессом алмазного бурения  
Попова М.С., Нескоромных В.В., Зотов З.Г., Баочанг Л. 103  
**Modern basis of automation of diamond drilling control**  
Popova M.S., Neskormnykh V.V., Zotov Z.G., Baochang L.
- Влияние пожаров растительности на состояние атмосферного воздуха г. Биробиджана  
Зубарева А.М., Глаголев В.А., Жучков Д.В. 113  
**Influence of vegetation fires on the state of atmospheric air in Birobidzhan**  
Zubareva A.M., Glagolev V.A., Zhuchkov D.V.
- Влияние технологических параметров на эффективность гидроразрыва пласта  
Хижняк Г.П., Диенг А. 120  
**Influence of technological parameters on hydraulic fracturing efficiency**  
Khizhniak G.P., Dieng A.
- Модернизация технологического процесса подготовки природного газа  
Лиинтин И.А., Ерофеев В.И. 126  
**Modernization of natural gas treatment**  
Liintin I.A., Erofeev V.I.
- Термофизические характеристики полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами для электротехнических устройств  
Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. 134  
**Thermophysical characteristics of polymeric composite materials with carbon components for electrical devices**  
Minakova N.N., Ushakov V.Ya.
- Разработка и опыт применения комплексной механистической модели виртуального расходомера для скважин, оборудованных электроцентробежными насосами  
Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В., Андреев Д.В. 140  
**Development and experience in application of a complex mechanistic model of a virtual flow meter for wells equipped with electric centrifugal pumps**  
Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V., Andreev D.V.
- Расчет напряженно-деформированного состояния трубопроводов, подверженных канавочному износу методом конечных элементов  
Султанмагомедов Т.С., Халиков Т.М., Бахтизин Р.Н., Султанмагомедов С.М. 151  
**Calculation of the stress-strain state of pipelines subject to groove wear by the finite element method**  
Sultanmagomedov T.S., Khalikov T.M., Bakhtizin R.N., Sultanmagomedov S.M.

- |  |            |   |
|--|------------|---|
| <b>Оценка инженерно-геокриологических условий территории трассы эксплуатируемого трубопровода на междуречье Малхойяха–Пур</b><br>Филимонов А.А., Строкова Л.А.   | <b>163</b> | <b>Assessment of engineering and geocryological conditions of the territory of the operated pipeline route on the Malkhoyakha–Pur interfluve</b><br>Filimonov A.A., Strokov L.A.  |
| <b>Применение методики исследования характеристик наддолотного струйного насоса для временной изоляции продуктивного пласта</b><br>Мельников А.П., Буглов Н.А.   | <b>176</b> | <b>Application of the methodology for studying the characteristics of a near-bit jet pump for temporary isolation of a productive reservoir</b><br>Melnikov A.P., Buglov N.A.   |
| <b>Оценка перспектив применения технологии искусственного интеллекта для отбойки пород гидромонитором при наличии в его струе тонкодисперсных частиц</b><br>Шкаруба Н.А., Набижанов Ж.И., Косолапов А.И., Кирсанов А.К., Тешаев У.Р. | <b>185</b> | <b>Evaluation of prospects for application of artificial intelligence technology for breaking rocks by a hydromonitor with fine particles in its jet</b><br>Shkaruba N.A., Nabizhanov Zh.I., Kosolapov A.I., Kirsanov A.K., Tshaev U.R. |
| <b>Динамика химического состава вод постпирогенных болот в условиях лесотундры и тайги Западной Сибири</b><br>Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А.  | <b>193</b> | <b>Wildfire-related changes of mire water chemistry in forest-tundra and taiga zones of Western Siberia</b><br>Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A.   |
| <b>Кинетика процесса парового пиролиза отработанных шин</b><br>Ларионов К.Б., Губин В.Е., Горшков А.С.   | <b>204</b> | <b>Waste tire steam pyrolysis kinetic</b><br>Larionov K.B., Gubin V.E., Gorshkov A.S.   |

УДК 544.02(282.256.615)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА, КИСЛОРОДА И УГЛЕРОДА ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Лепокурова Олеся Евгеньевна<sup>1,2</sup>,  
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Иванова Ирина Сергеевна<sup>1</sup>,  
ivanovais\_1986@mail.ru

Пыряев Александр Николаевич<sup>3,4</sup>,  
pyrayev@igm.nsc.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.

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

<sup>4</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

**Актуальность.** Стабильные изотопы широко используются в геохимии при решении различных генетических задач, что связано с допущением о постоянстве первозданного изотопного состава любого элемента, впоследствии измененного под воздействием различных процессов. В практике исследований поверхностных вод изотопные методы применяются при решении не только прямых генетических, но и различных сопутствующих приложений. В арктических регионах, подверженных влиянию многолетней мерзлоты, изотопы воды все чаще используются для оценки вклада талых вод в баланс общего речного стока, особенно в условиях ускорения темпов таяния, что ведет к изменению гидрологического режима и общей структуры ландшафта. Анализ изотопного состава водорастворенного углерода представляет отдельный исследовательский интерес, поскольку дает представление об участии высвобождаемого при таянии мерзлотных торфов органического вещества в изотопном обмене с водами. Совместное использование химических и изотопных характеристик водных объектов позволит детально изучить генезис, особенности формирования и взаимодействия данных вод с окружающей средой.

**Цель:** уточнение генезиса и условий формирования поверхностных водных объектов арктических районов Западной Сибири, подверженных влиянию многолетней мерзлоты, с использованием состава стабильных изотопов Н, О, С.

**Объекты:** поверхностные водные объекты тундровой и лесотундровой природных зон Ямало-Ненецкого автономного округа. Полевые исследования проводили в августе 2020 г. Пробы воды на изотопный состав были отобраны в трех крупных реках – Обь, Таз, Пур, и в правом притоке реки Пур – Нгарка-Хадьтаяха, в 7 крупных озерах (площадь от 25 тыс. до 300 тыс. м<sup>2</sup>) и в 1 малом термокарстовом озере (12 м<sup>2</sup>), в 3 просадках (начальная стадия образования термокарстовых озер) и 2 почвенных разрезах. Всего 17 проб воды. Кроме того, были отобраны 5 образцов торфа на одном почвенном разрезе в пяти интервалах по глубине до 55 см.

**Методы.** Химический состав вод был проанализирован в аккредитованной Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета методами титрования, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, фотометрии, ионной хроматографии и высокотемпературного каталитического окисления. Исследования изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты проводилось в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II.

**Результаты.** Приведены данные по изотопному составу кислорода и водорода вод, а также водорастворенного углерода для поверхностных вод тундровой и лесотундровой природных зон ЯНАО. Показано, что для каждого объекта (почва, просадка, озеро и реки) характерны индивидуальные интервалы значений  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C$  (водорастворенный углерод), что указывает на разную специфику их формирования и позволяет их дифференцировать. Сопоставление с уже имеющимися данными по  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  атмосферных осадков, поверхностных вод и снега региона выявило, что речные и почвенные воды, в сравнении с другими водными объектами, формировались в более холодных условиях. Значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  указали на наличие двух источников углерода в поверхностных водах региона: биогенный (легкий) и почвенный диффузионный, наследующий изотопный состав атмосферы (тяжелый). Первый преобладает в почвенных водах, просадках, мелких озерах и, по-видимому, в застойных водах рек. В крупных озерах и в активном течении реки больше проявляется почвенный диффузионный  $CO_2$ . Влияние в регионе таяния многолетней мерзлоты проявляется в облегчении значений  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  (более легкие талые воды), а также в облегчении  $\delta^{13}C_{DIC}$  (при высвобождении из почвы и торфов дополнительного биогенного углерода). Составлена схема возможной интерпретации состава стабильных изотопов природных вод и водорастворенного углерода в регионе. Результаты исследований могут быть использованы для установления генезиса природных вод региона, уточнения условий их формирования, выявления процессов деградации многолетнемерзлых толщ, оценки темпов деградации, реконструкции палеоклимата и т. д.

### Ключевые слова:

Поверхностные воды, торф, стабильные изотопы углерода, водорода, кислорода, арктические районы, Ямало-Ненецкий автономный округ, генезис, мерзлота.

## Введение

Стабильные изотопы широко используются в геохимии при решении различных задач. При изотопных исследованиях прибегают к допущению о постоянстве первозданного изотопного состава любого элемента, существованию измененного впоследствии в природных объектах под воздействием разнообразных природных и техногенных процессов [1, 2]. При изучении природных вод используют стабильные изотопы как самого растворителя, т. е. водорода и кислорода, так и растворенных веществ, чаще всего углерода из-за широкого его распространения, простоты и доступности определения, а также показателности с точки зрения взаимодействия вод с окружающей средой [3]. В практике исследований поверхностных вод изотопные методы применяются не только при решении прямых генетических задач, но и для оценки источников питания [4] и возможности смешения с подземными [5], морскими [6] и болотными [7] водами, для оценки изменения баланса [8], наличия испарения [9, 10], антропогенного загрязнения [11] и т. д.

В арктических регионах, подверженных влиянию многолетней мерзлоты, изотопы воды и водорастворенного углерода все чаще используются для оценки вклада талых вод в баланс общего речного стока [12–14], особенно в условиях ускорения темпов деградации мерзлоты [15–18]. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа уже проводились работы по изучению стабильных изотопов кислорода и водорода поверхностных (речных, озерных) и приповерхностных грунтовых вод для понимания доминирующих процессов образования стока в условиях, подверженных влиянию многолетней мерзлоты [19]. Результаты показали, что сток весной образуется за счет смешения талых вод с большими объемами вод озер и почв, а также наличия тесной гидравлической связи между водными объектами и ландшафтом. Также имеются работы по изучению изотопно-кислородного и дейтериевого составов снежного покрова данной территории [20], которые указали на широтную зональность, связанную с температурным режимом времени выпадения осадков.

В рамках проекта РФ «Растворенное органическое вещество в контексте формирования гидрогеохимического облика северных территорий Западной Сибири» авторами проведены первые работы по изучению химического состава поверхностных вод региона [21], включая растворенное органическое вещество (РОВ) [22] и некоторые микрокомпоненты [23], а также форм миграции элементов, с акцентом на гумусовые кислоты [24]. Целью данных исследований было уточнить генезис и условия формирования поверхностных водных объектов арктических районов Западной Сибири, подверженных влиянию многолетней мерзлоты, с использованием стабильных изотопов Н, О, С. Для этого предполагается изучить изотопный состав воды в сравнении с уже имеющимися данными по поверхностным водам [19] и снегам региона [20], дополнить данными стабильных изотопов водорастворенного углерода, а также углерода торфа.

Последние могут, в том числе, указать на возможность высвобождения органического вещества из почв и торфов при таянии многолетней мерзлоты.

## Объекты исследования

Территория исследования приурочена к Арктической зоне Западной Сибири, административно располагается в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). На формирование климата влияют широко распространенная многолетняя мерзлота (с глубиной залегания 50–85 см), близость холодного Карского моря, обилие болот, озер и рек. Природные зоны – тундровая и лесотундровая. В геологическом разрезе преобладают осадочные породы: песчаники и сланцы, перекрытые четвертичными озерными и речными отложениями песка, ила и глины толщиной от нескольких метров до 200–250 м. Почвенный покров из-за низких температур воздуха, плоского рельефа и заболоченных условий в основном представлен торфяными, преимущественно олиготрофными, реже эутрофными, почвами толщиной от 1 до 3 м, имеющими мощные органогенные горизонты. Протяженная зима, короткое прохладное лето, сильные ветра, незначительная мощность снежного покрова – все это способствует промерзанию почвы на большую глубину [19, 24–26].

Наиболее крупными реками являются: Обь, Надым, Таз и Пур. Питание рек в основном происходит за счет осадков, преимущественно снеговых, в меньшей степени дождевых, а также за счет болотно-грунтовых вод. Густота речной сети составляет 0,38 км/км<sup>2</sup>, а среднемноголетний речной сток составляет 581,3 км<sup>3</sup>/год [27]. Водно-болотный и озерный покров может варьировать от 20 до 80 процентов исследуемой территории в течение года, в зависимости от сезонных гидрологических условий [25]. Таяние многолетней мерзлоты изменяет гидрологический режим и общую структуру ландшафта, либо увеличивая количество озер в районах сплошной вечной мерзлоты за счет развития термокарста, либо уменьшая количество озер и площадь поверхности за счет ускоренного осушения термокарстовых озер на территории распространения прерывистой мерзлоты [19, 28]. Замедленный круговорот веществ в условиях низких температур и заболоченность водосборов способствуют накоплению в поверхностных водах широкого спектра органических веществ.

## Полевые и аналитические исследования

Полевые исследования проходили в августе 2020 г. на территории четырех крупных водосборных бассейнов рек Оби, Таз, Пур, Надым. Пробы воды на изотопный состав были отобраны в трех крупных реках – Обь, Таз, Пур, и в правом притоке реки Пур – Нгарка-Хадытаяха, в 7 крупных озерах (площадью от 2,5 тыс. до 300 тыс. м<sup>2</sup>) и в 1 малом термокарстовом озере (12 м<sup>2</sup>), в 3 просадках (начальная стадия образования термокарстовых озер), дополнительно были отобраны воды из двух почвенных разрезов. Всего было отобрано 17 проб воды. Кроме того, были отобраны 5 образцов торфа из основных горизонтов поч-

венного разреза (№ 989р) около п. Газ-Сале (рис. 1). Отбор проб производили в точках, максимально удаленных от известных эксплуатируемых месторожде-

ний, чтобы минимизировать влияние вероятных производственных выбросов на исследуемые геохимические характеристики.

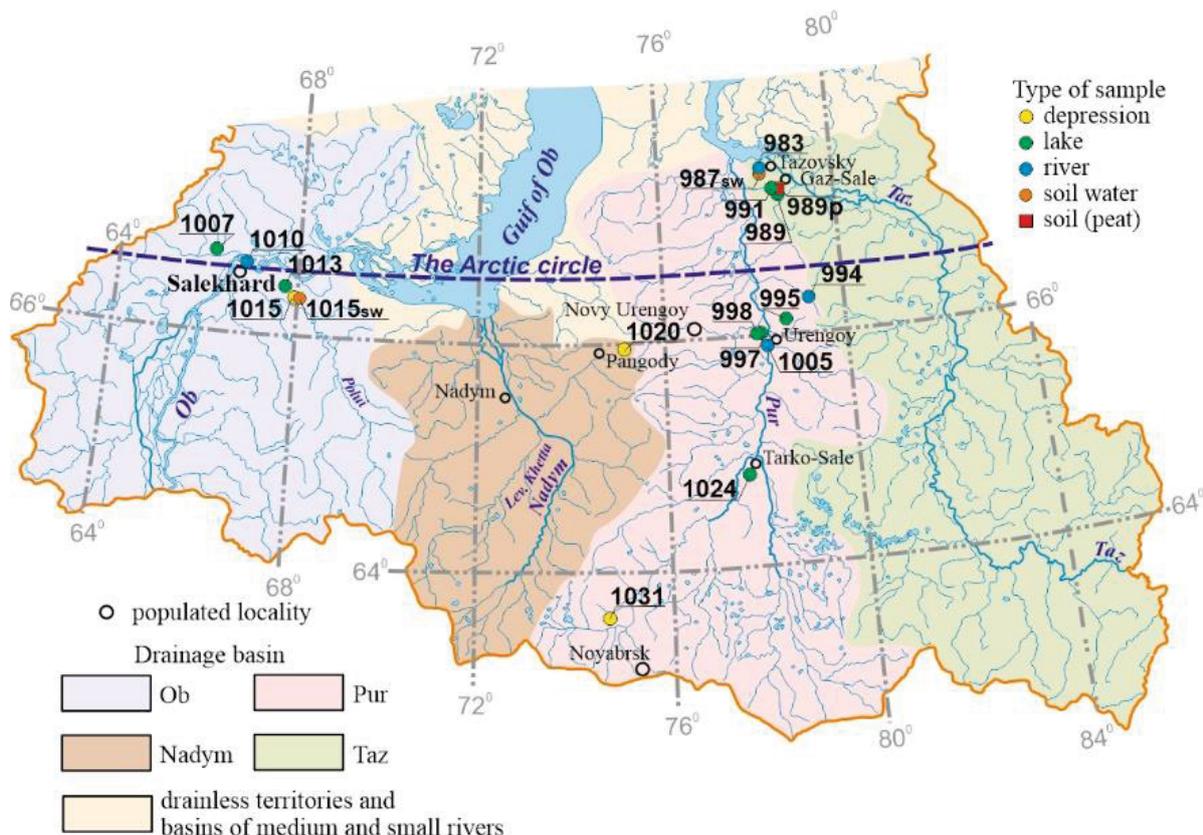


Рис. 1. Схема точек отбора проб в ЯНАО

Fig. 1. Scheme of sampling points in Yamalo-Nenets Autonomous Region (YaNAO)

Отбор речных проб осуществлялся в 4–5 м от берега, с глубины 0,5 м, в пределах активного течения выше мостов на 500 м; из озер пробы отбирались с глубины 0,5 м, в случае малого термокарстового озера и просадки – из середины, в случае крупного озера – в 4–5 м от берега. Пробы почвенных вод отобраны из разрезов, выполненных вблизи озера (№ 987) и просадки (№ 1015) в стеклянные емкости объемом 50 и 100 мл.

В каждой точке опробования были выполнены измерения быстромменяющихся показателей: температуры, pH, окислительно-восстановительного потенциала, электропроводности (HI98194, HANNA Instruments). Химический анализ вод проводился стандартными методами (титриметрии, потенциометрии, ионной хроматографии, фотоколориметрии, масс-спектрометрии, высокотемпературного каталитического окисления) в аккредитованной Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета. Изотопный состав кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты (DIC – dissolved inorganic carbon) и торфов был проанализирован в Институте геологии и минералогии СО РАН с использованием масс-спектрометра изотопных отношений Finnigan<sup>TM</sup> MAT 253, снабженного приставка-

ми пробоподготовки N/Device и GasBench II. Для определения изотопного состава углерода в торфах использовали систему пробоподготовки FlashEA 1112. Все измерения изотопного состава H, O, C, DIC в водах и торфах проводились согласно методикам, описанным в работах [29–33], относительно материалов сравнения МАГАТЭ [34]: NBS-18 и NBS-19 – при определениях  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ; VSMOW2, SLAP2 и GISP – при определениях  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ; NBS-22, IAEA-CH7 и USGS24 – при определениях  $\delta^{13}\text{C}$  в торфах. Погрешность измерений не превышала 0,2 ‰ при анализе изотопного состава углерода, 0,3 ‰ – кислорода и 2 ‰ – водорода. Все полученные результаты представлены относительно международных стандартов: VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite – Венский стандарт Белемнита формации Пии Дии) – при определениях  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  и VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water – Венский стандарт средней океанической воды) – при определениях  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ .

#### Результаты исследования

Сведения по химическому составу поверхностных вод с более детальным апробированием приведены в работах [21–24]. Кратко можем охарактеризовать их следующим образом. Практически повсеместно преобладают ультрапресные (минерализация от 2 до 140 при

среднем 17 мг/л) воды с высокими концентрациями РОВ ( $C_{орг}$  до 95,2 мг/л) и широким диапазоном значений pH от 3,9 до 7,9, но преимущественно характерна слабокислая и нейтральная среда (pH от 5 до 6). В направлении просадка → озера → реки увеличивается минерализация и pH вод, но уменьшается концентрации РОВ, состав вод меняется от сложного органосульфатно-хлоридно-гидрокарбонатного аммонийно-кальциево-натриевого (болота, просадки) до гидрокарбонатного кальциевого (реки). Высокие концентрации органических веществ в водах просадок указывают на существенное влияние в формировании их состава оттаивания органических горизонтов почв [22]. По результатам моделирования отмечается [24] большой процент образования органоминеральных соединений из-за повышенных содержаний гумусо-

вых кислот при общей низкой минерализации поверхностных вод.

В соответствии с предыдущими исследованиями [24] результаты изотопного состава вод сгруппированы по типу водного объекта (таблица). Была также рассчитана величина дейтериевого эксцесса ( $d_{exc}$ ) [35]:

$$\delta^2H - 8 * \delta^{18}O.$$

Это параметр связан с процессами кинетического изотопного фракционирования и зависит от условий формирования влаги [36, 37]. Когда значение  $d_{exc}$  равно 10, точка изотопного состава H и O образца находится на глобальной линии метеорных вод (GMWL – Global Meteoric Water Line), если  $d_{exc} < 10$ , то это сигнал об отклонении от равновесных условий фракционирования, т. е. влага, образующая исследованную воду, была сформирована в неравновесных условиях.

**Таблица.** Изотопный состав поверхностных вод и DIC

**Table.** Isotopic composition of surface waters and DIC

Номер пробы Sample number	Координаты, место отбора Coordinates, sampling location	Тип воды, pH, TDS мг/л Type of water, pH, TDS mg/L	$\delta^2H$ , (VSMOW)	$\delta^{18}O$ (VSMOW)	$d_{exc}$	$\delta^{13}C_{DIC}$ (VPDB)
			‰			
Почвенные воды/Soil water						
987	N 67°25'11,7" E 78°38'11,7"	нет данных no data	-106,2 (±1,5)	-15,0 (±0,2)	14,1	-17,9 (±0,1)
1015/1	N 66°19'49,4" E 68°01'11,4"		-110,2 (±2,1)	-15,3 (±0,2)	12,6	-23,5 (±0,1)
Воды просадок/Depressions water						
1015	N 66°19'49,4" E 68°01'11,4"	SO <sub>4</sub> -NH <sub>4</sub> -Ca, pH 3,89 M 16	-101,3 (±2,1)	-14,0 (±0,3)	10,9	-23,0 (±2,1)
1020	N 65°52'29,9" E 75°12'51,3"	SO <sub>4</sub> -NH <sub>4</sub> pH 5,06 M 7	-89,6 (±1,6)	-11,6 (±0,3)	2,9	-22,5 (±0,1)
1031	N 63°37'55,5" E 74°38'30,4"	SO <sub>4</sub> -NH <sub>4</sub> pH 4,06 M 9	-92,5 (±1,3)	-12,2 (±0,3)	5,0	-19,5 (±2,6)
Озерные воды/lake water						
989	N 67°19'47,3" E 78°58'48,6"	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na-Mg pH 6,05 M 21	-89,1 (±0,7)	-10,5 (±0,2)	-5,0	-6,8 (±0,1)
991	N 67°20'16,1" E 78°58'10,4"	HCO <sub>3</sub> -Ca-NH <sub>4</sub> pH 5,65 M 19	-100,6 (±1,3)	-12,0 (±0,3)	-4,4	-18,6 (±0,3)
995	N 66°05'04,3" E 78°41'38,0"	HCO <sub>3</sub> -Ca-NH <sub>4</sub> pH 6,14 M 6	-84,1 (±2,1)	-9,0 (±0,1)	-12,0	-10,7 (±0,3)
997	N 66°00'19,3" E 78°04'42,2"	HCO <sub>3</sub> -Na pH 5,27 M 12	-85,3 (±1,3)	-9,1 (±0,2)	-12,1	-6,4 (±0,2)
998	N 65°59'59,1" E 78°04'23,0"	HCO <sub>3</sub> -Na pH 5,96 M 17	-79,5 (±0,1)	-8,5 (±0,3)	-11,6	-17,0 (±0,4)
1007	N 66°41'48,9" E 66°07'35,5"	HCO <sub>3</sub> -Ca-Mg pH 6,10 M 28	-90,9 (±0,2)	-11,6 (±0,1)	1,6	-7,7 (±0,3)
1013	N 66°26'19,5" E 67°42'06,0"	HCO <sub>3</sub> -Ca-Mg pH 5,96 M 11	-85,6 (±0,6)	-10,4 (±0,3)	-2,6	-6,0 (±0,1)
1024	N 64°48'49,4" E 77°36'00,0"	SO <sub>4</sub> -NH <sub>4</sub> pH 4,10 M 2	-84,1 (±1,4)	-10,1 (±0,1)	-3,0	-19,0 (±0,3)
Речные воды/River water						
983	N 67°30'30,8" E 78°39'51,7" р. Таз/Taz	HCO <sub>3</sub> -Ca-Mg pH 7,7 M 94	-114,5 (±1,9)	-15,3 (±0,2)	7,5	-16,1 (±0,1)
994	N 66°17'13,3" E 79°15'04,7" р. Нгарка-Хадьгайаха Ngarka-Khadytayakha	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca pH 6,96 M 89	-114,9 (±0,3)	-15,4 (±0,1)	8,0	-17,2 (±0,1)
1005	N 65°54'53,0" E 78°14'01,3" р. Пур/Pur	HCO <sub>3</sub> -Mg-NH <sub>4</sub> pH 5,52 M 19	-100,0 (±1,0)	-12,3 (±0,3)	-1,3	-5,3 (±0,4)
1010	N 66°36'52,9" E 66°42'16,5" р. Обь/Ob	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na pH 7,85 M 130	-102,4 (±0,6)	-13,5 (±0,2)	5,5	-8,1 (±0,3)

Если нанести полученные результаты на диаграмму  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  и сопоставить их с данными [19], то можно увидеть следующую картину (рис. 2, а, b). Почвенные, озерные и речные воды попадают в интерва-

лы значений уже изученных вод:  $\delta D$  от  $-110,2$  до  $-106,2$  ‰, от  $-100,6$  до  $-84,1$  ‰, от  $-114,9$  до  $-100,0$  ‰ соответственно,  $\delta^{18}O$  от  $-15,3$  до  $-12,0$  ‰, от  $-14,0$  до  $-8,5$  ‰, от  $-15,4$  до  $-12,3$  ‰ соответственно.

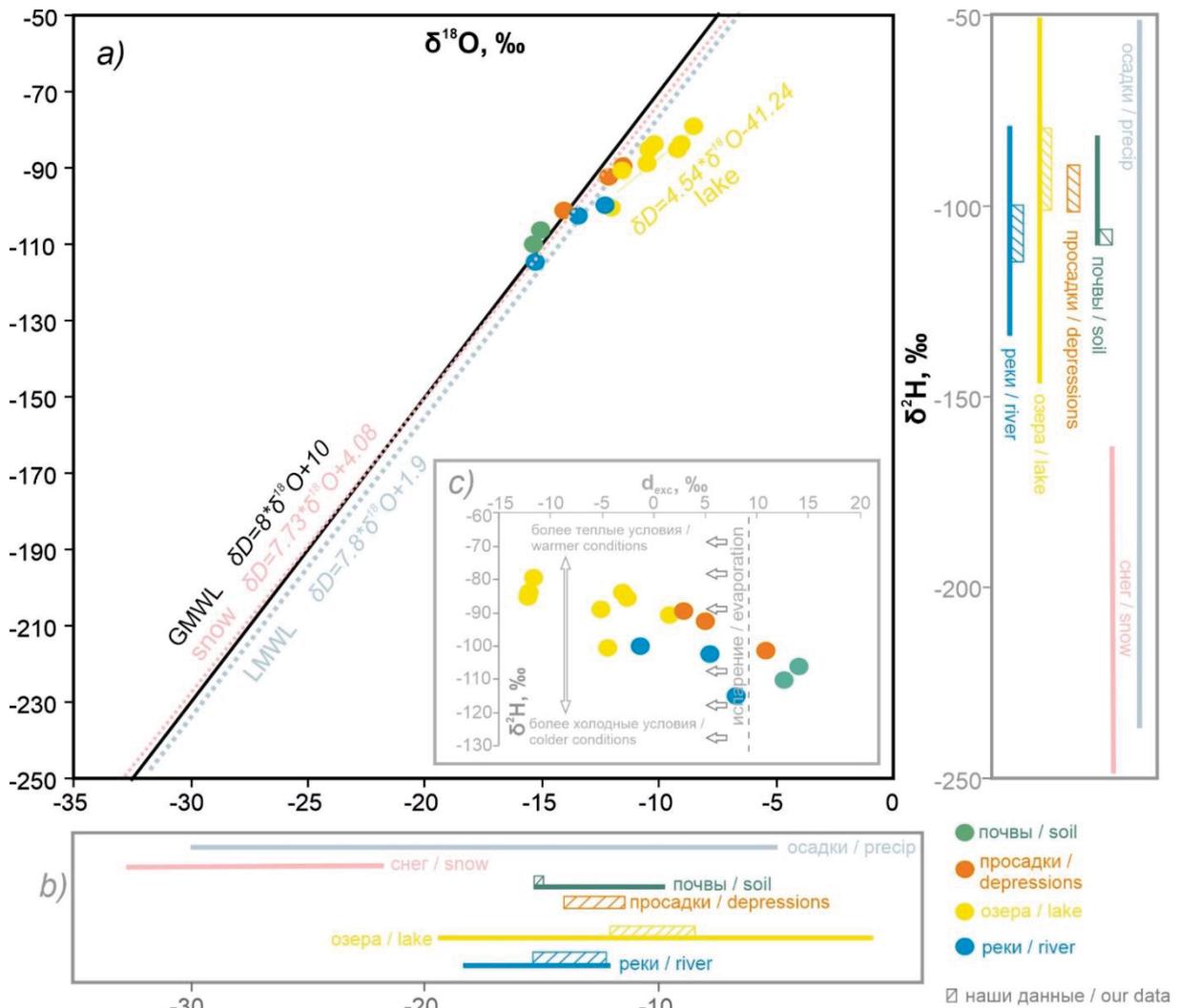


Рис. 2. Соотношение значений  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  для поверхностных вод ЯНАО с нанесением глобальной линии метеорных вод (GMWL) [38], локальной линии метеорных вод (local meteor water line LMWL) [19] (а), данных по изотопному составу снежного покрова Западной Сибири [20] и поверхностных вод [19] (b) и соотношение  $\delta D$  с  $d_{excess}$  (c)

Fig. 2.  $\delta D$  vs  $\delta^{18}O$  for surface waters of YaNAO relative to GMWL [38], the local meteor water line (LMWL) [19], data on the isotope composition of snow cover in Western Siberia [20] and surface waters [19] (b) and the ratio of  $\delta D$  to  $d_{excess}$  (c)

Можно отметить, что почвенные воды имеют наиболее легкий изотопный состав (наименьшие значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ) в интервале, характерном для почвенных вод Западно-Сибирского региона (рис. 2, b), что, возможно, связано с большим вкладом талых вод, поскольку это северные районы региона. Как показано [20], снега обеднены тяжелыми изотопами, отличаясь изотопным составом от всех других водных объектов (реки, почвенные воды, озера) (рис. 2, b), и тем самым выступают потенциально хорошим индикатором таяния мерзлоты в ландшафте.

Для трех образцов вод просянок данные получены впервые:  $\delta D$  от  $-101,3$  до  $-89,6$  ‰,  $\delta^{18}O$  от  $-14,0$  до  $-11,6$  ‰. В целом для них, видимо, характерны промежуточные значения между почвенными и озерными

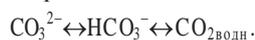
водами. Для более убедительного утверждения необходимо больше данных.

При сравнении полученных результатов по всем водным объектам очевидно наиболее выраженное обогащение тяжелыми изотопами вод озер, особенно  $^{18}O$  («изотопный кислородный сдвиг» [39]), что, скорее всего, вызвано фракционированием при испарении [2, 40, 41]. Линия регрессии по восьми точкам получилась  $\delta^{2}H = 4,54 \cdot \delta^{18}O - 41,24$ , т. е. с уклоном 4,54, что ниже LMWL (7,8) и уклона, полученного для озер региона (5,54) [19]. Более отчетливо о наличии неравновесных процессов формирования влаги (процесса испарения) можно судить по величине дейтериевого эксцесса (таблица, рис. 2, c). В наибольшей степени они проявились в водах рек и просянок, т. е.

для всех открытых водоемов, характеризующихся аэробными условиями. При этом речные и почвенные воды, иногда воды просадок, в сравнении с другими водными объектами имеют более легкий изотопный состав  $\delta D$  (рис. 2, *с*) и  $\delta^{18}O$ , т. е. формировались в более холодных условиях. Для речных вод это связано с более активным движением водных масс, для почвенных и вод просадок, видимо, – с влиянием талых вод. Озёрные воды формируются в застойном режиме, вода успевает нагреться и для них в большей степени проявляются эффекты эвапотранспирации [42, 43].

Таким образом, совместное изучение  $d_{\text{ex}}$  с изотопным составом вод ( $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ) помогает детальнее определить условия их формирования и гидрологического режима. Эти показатели могут служить индикаторами для различных типов водных объектов или их возможного смешения.

В водах, обогащенных органическим веществом, кроме изотопного состава самого растворителя важно было изучить изотопный состав водорастворенного углерода – DIC, представляющего собой сумму трех диссоциатов угольной кислоты, совместно существующих в растворе:



Переход одной формы в другую сопровождается фракционированием с соответствующим коэффициентом  $\epsilon$  [44]. При этом гидрокарбонат-ион, как правило, тяжелее газообразной углекислоты в среднем на 5–7 ‰ [45]. Согласно [44], переход газообразного  $\text{CO}_{2\text{газ}}$  в раствор сопровождается различными коэффициентами фракционирования, в зависимости от формы DIC: в среднем в случае перехода  $\text{CO}_{2\text{газ}} \rightarrow \text{DIC}$  величина  $\epsilon$  в диапазоне температур 5–23 °C составляет 8–10 ‰. Однако на распределение изотопов углерода в системе «газ – водный раствор – твердый осадок» могут оказывать заметное влияние такие факторы, как неравновесный характер процесса, время взаимодействия, химический состав водного раствора, температура воды, pH и прочее [46].

Начиная с поверхности, основные источники углерода в водах – атмосферная (относительно тяжелая, с  $\delta^{13}C$  от –11 до –5 ‰ при среднем –7 ‰) и биогенная (относительно легкая, с  $\delta^{13}C$  от –30 до –18 ‰ при среднем ~–25 ‰ [3, 40, 47, 48] углекислоты (рис. 3). Самый тяжелый  $\text{CO}_2$  (до +8 ‰) [49], образованный при разложении карбонатов, в данных условиях не рассматривался. Можно отметить, что значения  $\delta^{13}C$  варьируют у разных исследователей, здесь приведены наиболее встречаемые, по мнению авторов.

Результаты показали (таблица, рис. 3, *а, б*), что интервал значений  $\delta^{13}C(\text{DIC})$  очень широкий для поверхностных вод: от –23,5 до –5,3 ‰. При этом четко выделяются две группы вод, отличающиеся друг от друга (рис. 3, *а*). К первой группе с более легким изотопным составом от –23,5 до –16,1 ‰ относятся почвенные воды, воды просадок, часть озерных и речных вод. Источник DIC здесь однозначно биогенный. Во вторую группу с более тяжелыми значениями  $\delta^{13}C$  от –10,7 до –5,3 ‰, а значит атмосферным источником  $\text{CO}_2$ , попадают только речные и озерные воды.

Если рассматривать отдельно по водным объектам, то можно сделать следующие выводы. Почвенные и воды просадок характеризуются схожими между собой и наиболее легкими значениями  $\delta^{13}C(\text{DIC})$  от –23,5 до –17,9 ‰, однозначно указывающими на биогенный источник  $\text{CO}_2$ . В данном случае можно сказать, что DIC формировался в восстановительной среде с большим содержанием органических веществ.

Речные и озерные воды также характеризуются схожими между собой, но уже более тяжелыми значениями  $\delta^{13}C$  от –19,0 до –5,3 ‰. В данном случае в формировании гидрокарбонат-иона (DIC) принимали участие две углекислоты: тяжелая атмосферная и легкая биогенная (почвенная). При этом трудно сказать, в какой пропорции происходило такое смешение. Судя по рис. 3, *а*, присутствует либо биогенная углекислота, либо атмосферная. Однако данных недостаточно, чтобы говорить однозначно. При этом биогенный  $\text{CO}_2$  характерен для мелких озер (с площадью менее 100 тыс. м<sup>2</sup>), для крупных – атмосферный, кроме одного исключения (рис. 3, *с*). В малых реках, а также, по-видимому, в истоках и заводях – биогенный углерод, в водных объектах с активным течением – атмосферный. Аналогичные отличия изотопного состава DIC от глубины водотоков и скорости движения воды описаны авторами в работе [41], где обогащение/обеднение вод углекислотой определенного изотопного состава связывают с интенсивностью их перемешивания и взаимодействия с атмосферой при движении. В нашем случае для мелких озер, воды которых характеризуются малоинтенсивным перемешиванием и насыщены органическим веществом (застойные воды – низкая скорость обмена углекислотой с воздухом), вклад биогенной углекислоты в DIC существенно выше. В крупных водоемах с интенсивным течением воды и большой площадью зеркала (реки и крупные озера) относительное содержание органических веществ ниже, при этом интенсивность газообмена с атмосферой (в том числе атмосферным  $\text{CO}_2$ ) выше. В этом случае и вклад атмосферной углекислоты в общий баланс DIC будет большим.

Значения  $\delta^{13}C$  в органическом веществе торфов, отобранных из почвенного разреза у п. Газ-Сале (Тазовский район) с интервалов глубин 0–10; 15–25; 25–30; 30–40; 55 см, варьируют в диапазоне от –30,4 до –27,3 ‰ (рис. 3, *д*), составляя в среднем –29 ‰, т. е. достаточно низкие значения даже для торфа [47, 50]. В целом на величину  $\delta^{13}C$  торфа влияют: изотопный состав растений [51], температура, влажность [52] и степень разложения органического вещества [53]. Более легкий состав может указывать на влажные анаэробные условия формирования торфа [54]. Изменение  $\delta^{13}C$  торфа с глубиной происходит скачкообразно, но в целом значения закономерно уменьшаются. Подобная функция изменения значений  $\delta^{13}C$  в торфах может указывать на глубину их активного взаимодействия с атмосферой, частичное окисление ОВ торфов с потерей легких изотопов либо же свидетельствовать о смене механизма преобразования органического вещества, о чем упоминалось ранее. Этот вопрос требует дополнительных исследований, и на данном

накопительном этапе значения  $\delta^{13}\text{C}$  торфа региона могут служить одной из реперных характеристик при изучении формирования состава DIC. Например, при

исследовании доли вклада углерода талых торфов, а также при картировании распределения изотопного состава углерода в природных объектах региона.

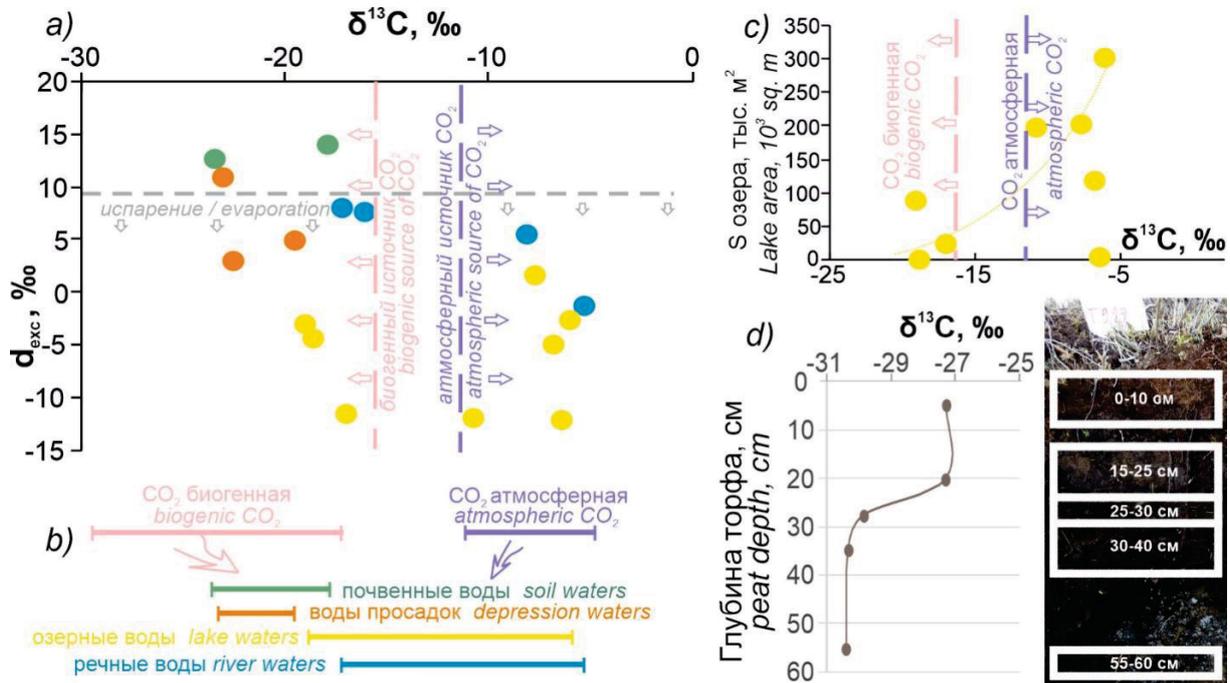


Рис. 3. Изотопный состав углерода: а) в DIC для поверхностных вод ЯНАО в сопоставлении с  $d_{\text{exx}}$ ; б) характерные средние значения для биогенного и атмосферного  $\text{CO}_2$ ; в) в DIC в зависимости от площади озера; д) в торфах у с. Газ-Сале по глубине

Fig. 1. Carbon isotope composition: a)  $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$  vs  $d_{\text{exx}}$  of YaNAO surface waters; b) specific mean  $\delta^{13}\text{C}$  values of biogenic and atmospheric  $\text{CO}_2$ ; c)  $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$  vs lake surface; d) distribution of  $\delta^{13}\text{C}$  in peats vs depth near the Gas-Sale village

Для идентификации генезиса и условий формирования вод лучше всего использовать комплексные изотопно-геохимические исследования. Например, имеются работы по разделению источников морских и пресных вод в заливах с использованием системы «изотопы воды – минерализация» [55]. В нашем случае относительно показательными стали графики зависимости  $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$  от содержания в водах  $\text{C}_{\text{орг}}$  и гидрокарбонат-иона (рис. 4). В общем случае с увеличением концентрации  $\text{HCO}_3^-$  утяжеляется изотопный состав DIC. Это достаточно типичная ситуация для многих природных вод [56] и связана в основном с различными физико-химическими факторами изо-

топного фракционирования. Судя по рис. 4, а, можно предположить, что существуют две линии регрессии, отличающиеся друг от друга в зависимости от начального источника углерода. То есть источники углерода были действительно разные и между собой не смешивались. Закономерно, что с увеличением содержания  $\text{C}_{\text{орг}}$  в водах увеличивается и содержание изотопно-легкой углекислоты. То есть водорастворенное органическое вещество активно изменяет изотопный состав DIC, являясь его важным источником. Однако на рис. 4, б видно разное поведение  $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ , что в том числе может указывать на разные источники углерода.

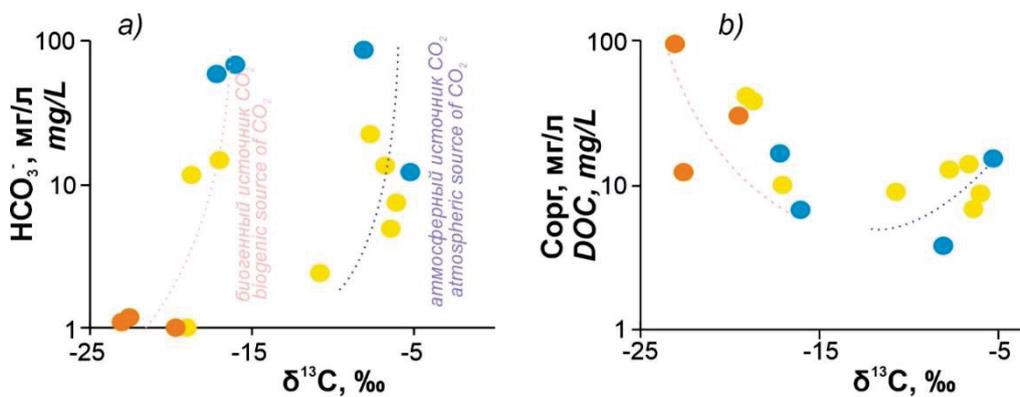


Рис. 4. Зависимость значений  $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$  в поверхностных водах ЯНАО от концентраций: а) гидрокарбонат-иона, б)  $\text{C}_{\text{орг}}$   
 Fig. 4. Carbon isotope composition  $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$  in YaNAO surface waters vs concentrations of: a) hydrocarbon-ion, b) DOC

Обобщая выше сказанное, была составлена приблизительная схема возможной интерпретации и использования стабильных изотопов природных вод и водорастворенного углерода в регионе (рис. 5). Для

каждого водного объекта характерны свои интервалы значений  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C(DIC)$ , что позволяет их дифференцировать и указывает на разную специфику их формирования.

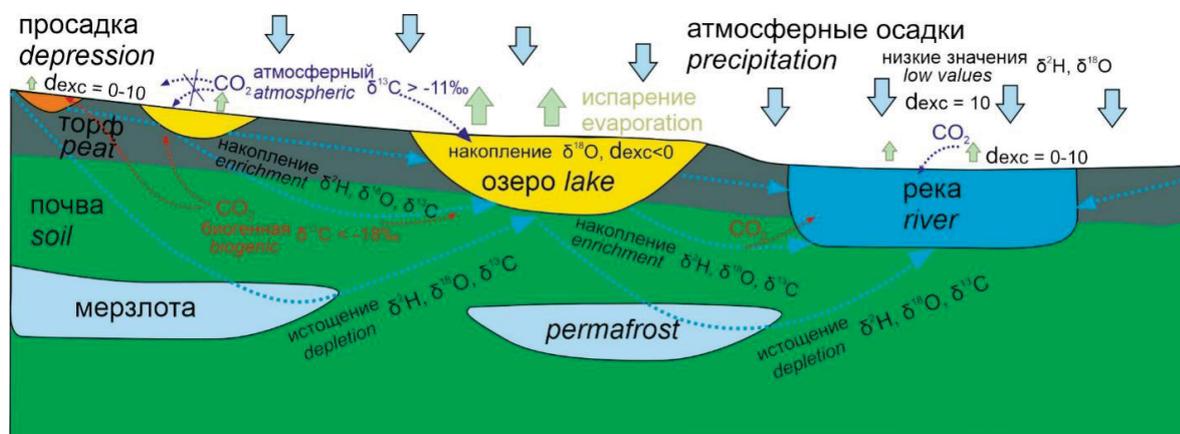


Рис. 5. Схема возможной интерпретации формирования состава стабильных изотопов природных вод и водорастворенного углерода в регионе

Fig. 5. Scheme of possible interpretation of the composition of stable isotopes of natural waters and water-dissolved carbon in the region

Почвенные воды по изотопному составу близки к метеорным, а в формировании DIC принимает участие преимущественно биогенный  $CO_2$ . В водах просянок и рек уже начинают проявляться процессы испарения, на что указывают утяжеление  $\delta^{18}O$  и уменьшение параметра  $d_{exc}$  в интервале 0–10 ‰. В озерных водах процессы испарения становятся еще более выраженными –  $d_{exc} < 0$  ‰. При этом для просянок основным источником DIC остается биогенная углекислота, а в речных и озерных водах с увеличением разраера озер и интенсивности потока движения начинает принимать активное участие атмосферный утяжеленный  $CO_2$ .

В целом при одном источнике вод и углерода и одинаковых условиях эволюция природных вод идет с накоплением тяжелых изотопов D,  $^{18}O$  в направлении атмосферные осадки → почвенные воды → воды просянок → речные и озерные воды. Однако при общем генезисе вод – метеорном (инфильтрационном) – в отдельных водоемах доминирующими служат два основных источника углекислоты (биогенный и атмосферный), а в озерных водах их конкуренция усугубляется процессами дегазации и газообмена с атмосферой, способными существенно изменить изотопный состав DIC [57]. Совокупность вышеизложенных факторов приводит к широкому разнообразию изотопного состава кислорода, водорода и DIC вод региона.

При таянии многолетней мерзлоты в общий водный баланс должны поступать воды с очень легким изотопным составом, примерно равным значениям в снегах региона ( $\delta D < -150$  ‰ и  $\delta^{18}O < -20$  ‰), согласно [20]. Заниженные значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  водных объектов свидетельствуют о питании тальми водами, поступающими из мерзлых пород и торфов. Соответственно, при высвобождении богатых органикой тальных вод добавляется биогенный источник углерода, и

значения  $\delta^{13}C(DIC)$  также обедняются тяжелым изотопом  $^{13}C$ . Таким образом, таяние мерзлых почв и торфов в регионе проявляется в совместном обеднении значений  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C(DIC)$  поверхностных вод. Вопрос влияния процессов таяния многолетней мерзлоты на подземные воды на текущий момент остается открытым и планируется к дальнейшему изучению в виде продолжения этой темы.

#### Выводы

1. Проведены комплексные исследования по распределению стабильных изотопов кислорода, водорода и углерода в природных поверхностных водах тундровой и лесотундровой зон ЯНАО. Все изученные объекты имеют индивидуальный набор интервалов значений  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C(DIC)$ , что обусловлено спецификой их формирования и взаимодействия с окружающей средой.
2. Установлен метеорно-инфильтрационный генезис всех изученных вод, осложненный в ряде случаев процессами испарения. В целом в ряду атмосферные осадки → почвенные воды → воды просянок → речные и озерные воды наблюдали обогащение вод тяжелыми изотопами. Для отдельных объектов установлено частичное питание тальми водами, приводящее к обедненным значениям  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ .
3. Изотопный состав DIC указывает на два основных источника углекислоты – атмосферная и биогенная. Участие в питании водоемов тальных вод, инфильтрующихся через торфы, приводит к закономерному обогащению вод легкой углекислотой.
4. Впервые представлены данные по изотопному составу углерода в торфах региона, варьирующему в диапазоне от  $-30,4$  до  $-27,3$  ‰, увеличивая содержание тяжелого изотопа  $^{13}C$  с уменьшением глубины залегания. Подобная функция изменения

значений  $\delta^{13}\text{C}$  в торфах может указывать на глубину их активного взаимодействия с атмосферой, частичное окисление органических веществ торфов с потерей легких изотопов либо свидетельствовать о смене механизма преобразования органического вещества. В целом полученные данные могут служить реперной характеристикой при изучении органических веществ региона.

5. Составлена приблизительная схема возможной интерпретации состава стабильных изотопов природных вод и водорастворенного углерода в регионе, которая поможет в дальнейшем правильно использовать полученные результаты для установления

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ранкама К. Изотопы в геологии / пер. с англ. И.Д. Беспаловой и др. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – 464 с.
2. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 9<sup>th</sup> ed. – Switzerland: Springer Nature AG, 2021. – 528 p.
3. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадионных вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
4. Identifying the moisture source of atmospheric precipitation in a typical alpine river watershed using stable H-O isotopes and HYSPLIT model / T.N. Li, W.B. Rao, H.B. Tan, Y.W. Li, T. Tan // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – V. 15. – 346.
5. Abdeldjebbar T., Mohammed H., Messouad H. Origin and age of the surface water and groundwater of the Ouargla basin-Algeria // Energy Procedia. – 2019. – V. 157. – № 2018. – P. 111–116.
6. Оценка влияния вод малых рек на приповерхностные воды Черного моря по изотопным данным / Ю.Н. Чижова, С.А. Добролюбов, Н.А. Буданцева, Г.В. Суркова, С.С. Мухаметов, С.А. Мысленков, Ю.К. Васильчук // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2011. – № 6. – С. 54–59.
7. Строганова Т.А., Прасолов Э.М. Изотопный состав грунтовых и поверхностных вод болотного массива Ламмин-Суо (Ленинградская область) // Региональная геология и металлогения. – 2019. – № 77. – С. 20–26.
8. Cumulative effects of cascade dams on river water cycle: evidence from hydrogen and oxygen isotopes / B.L. Wang, H.T. Zhang, X. Liang, X.D. Li, F.S. Wang // Journal of Hydrology. – 2019. – V. 568. – P. 604–610.
9. Babka B., Futo I., Szabo S. Seasonal evaporation cycle in oxbow lakes formed along the Tisza River in Hungary for flood control // Hydrological processes. – 2018. – V. 32. – № 13. – P. 2009–2019.
10. Борзенко С.В. Изотопный состав вод солёных озёр восточного Забайкалья // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488. – № 2. – С. 176–180.
11. A multiple isotope (H, O, N, C and S) approach to elucidate the hydrochemical evolution of shallow groundwater in a rapidly urbanized area of the Pearl River Delta, China / X. Li, Ch. Tang, Y. Cao, D. Li // Science of Total Environment. – 2020. – V. 724. – P. 137930.
12. Paulsson O., Widerlund A. Pit lake oxygen and hydrogen isotopic composition in subarctic Sweden: A comparison to the local meteoric water line // Applied geochemistry. – 2020. – V. 118. – P. 104611.
13. Reconstructing Arctic precipitation seasonality using aquatic leaf wax  $\delta^2\text{H}$  in lakes with contrasting residence times / E.K. Thomas, K.V. Hollister, A.A. Cluett, M.C. Corcoran // Paleogeography and Paleoclimatology. – 2020. – V. 35. – № 7. – P. 2020PA003886.
14. Seasonal variability in temperature trends and atmospheric circulation systems during the Eemian (Last Interglacial) based on n-alkanes hydrogen isotopes from Northern Finland / C. Katrantsiotis, E. Norstrom, R.H. Smittenberg, J.S. Salonen, A. Pliik, K. Helmens // Quaternary science reviews. – 2021. – V. 273. – P. 107250.
15. Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C. Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation // Water Research. – 2007. – V. 43. – P. W03406.
16. Токарев И.В. Использование изотопных данных ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) при изучении процессов деградации мерзлоты в результате долговременных вариаций климата // Записки Горного института. – 2008. – Т. 176. – С. 191–195.
17. A Wetter Arctic coincident with hemispheric warming 8,000 years ago / E.K. Thomas, I.S. Castaneda, N.P. McKay, J.P. Briner, J.M. Salacup, K.Q. Nguyen, A.D. Schweinsberg // Geophysical research letters. – 2018. – V. 45. – № 19. – P. 10637–10647.
18. Hydro climatic controls on the isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^3\text{H}$ , d-excess) traits of pan-Arctic summer rainfall events / M. Mellat, H. Bailey, K.R. Mustonen, H. Marttila, E.S. Klein, K. Gribanov, M.S. Bret-Harte, A.V. Chupakov, D.V. Divine, B. Else, I. Filippov, V. Hyöky, S. Jones, S.N. Kirpotin, A. Kroon, H.T. Markussen, M. Nielsen, M. Olsen, R. Paavola, O.S. Pokrovsky, A. Prokushkin, M. Rasch, K. Raundrup, O. Suominen, I. Suvänpää, S.R. Vignissou, E. Zarov and J.M. Welker // Frontiers in Earth Science. – 2021. – V. 9. – P. 651731.
19. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape / P. Ala-Aho, C. Soulsby, O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin, J. Karlsson, S. Serikova, S.N. Vorobyev, R.M. Manasyrov, S. Loiko, D. Tetzlaff // Journal of Hydrology. – 2018. – V. 556. – P. 279–293.
20. Изотопно-кислородный и дейтериевый состав снежного покрова Западной Сибири на профиле от Томска до Обской губы / Ю.К. Васильчук, В.П. Шевченко, А.П. Лисицын, Н.А. Буданцева, С.Н. Воробьев, С.Н. Кирпотин, И.В. Крицков, Р.М. Манасыпов, О.С. Покровский, Ю.Н. Чижова // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 471. – № 5. – С. 590–594.
21. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of Northern West Siberia / I.S. Ivanova, O.G. Savichev, N.S. Trifonov, Yu. V. Kolubaeva, N.A. Volkova // Water. – 2021. – V. 13. – P. 3107.
22. Особенности формирования химического состава поверхностных вод арктических территорий Западной Сибири / Е.А. Солдатова, И.С. Иванова, Ю.В. Колубаева, Д.А. Соколов // Геохимия. – 2022. – Т. 67. – № 11. – С. 1142–1156.
23. Иванова И.С., Колубаева Ю.В. Тяжелые металлы в поверхностных водах Ямало-Ненецкого автономного округа // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2021. – С. 67–70.
24. Растворенные формы миграции гумусовых кислот в поверхностных водных объектах Ямало-Ненецкого автономного округа / О.Е. Лепокурова, И.С. Иванова, Н.С. Трифонов, Ю.В. Колубаева, Д.А. Соколов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 56–69.
25. Seasonal variability of the Western Siberia wetlands from satellite radar altimetry / E.A. Zakharova, A.V. Kouraev, F. Rémy, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // Journal of hydrology. – 2014. – V. 512. – P. 366–378.
26. Шамилишвили Г.А., Абакумов Е.В., Печкин А.С. Особенности почвенного покрова Надымского района, ЯНАО // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2016. – № 4. – С. 12–16.

27. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». – М.: НИИ-Природа, 2019. – 290 с.
28. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M. A first pan-Arctic assessment of the influence of glaciation, permafrost, topography and peatlands on northern hemisphere lake distribution // *Permafrost Periglacial Processes*. – 2007. – V. 18. – P. 201–208.
29. Epstein S., Mayeda T. Variation of  $O^{18}$  content of waters from natural sources // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1953. – V. 4 (5). – P. 213–224.
30. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. – 2000. – № 4. – P. 1044–1046.
31. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric  $CO_2$  / M. Görka, P.E. Sauer, D. Lewicka-Szczepak, M.O. Jedrysek // *Environmental Pollution*. – 2011. – V. 159. – P. 294–301.
32. Correction algorithm for online continuous flow  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{18}O$  carbonate and cellulose stable isotope analyses / M.N. Evans, K.J. Selmer, B.T. Breeden III, A.S. Lopatka, R.E. Plummer // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2016. – V. 17. – P. 3580–3588.
33. Ultra-sensitive elemental analyzer/isotope ratio mass spectrometer for stable nitrogen and carbon isotope analyses / N.O. Ogawa, T. Nagata, H. Kitazato, N. Ohkouchi // *Earth, Life, and Isotopes*. – 2010. – P. 339–353.
34. Reference products for environment and trade. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (дата обращения 17.10.2022).
35. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. – 1964. – V. 19. – P. 435–463.
36. Seasonal deuterium excess variations of precipitation at summit, Greenland, and their climatological significance / B.G. Kopec, X. Feng, E.S. Posmentier, L.J. Songer // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2019. – V. 124. – P. 72–91.
37. Deuterium excess in marine water vapor: dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation / M. Benetti, G. Reverdin, C. Pierre, L. Merlivat, C. Risi, H.Ch. Steen-Larsen, F. Vimeux // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2014. – V. 119. – P. 584–593.
38. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science*. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
39. Craig H. Isotopic composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines // *Science*. – 1966. – V. 154. – P. 1544–1548.
40. Ферронский В., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный Мир, 2009. – 632 с.
41. Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А. Стабильные изотопы как инструмент контроля границ закрытых экосистем на примере бассейна р. Витим // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 148–157.
42. Gat J.R., Matsui E. Atmospheric water balance in the Amazon basin: an isotopic evapotranspiration model // *Journal of geophysical research*. – 1991. – V. 96. – № D7. – P. 13179–13188.
43. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2020. – V. 210. – P. 106445.
44. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of  $CO_2$  // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – V. 59. – № 1. – P. 107–114.
45. Vogel J.C. Über den Isotopengehalt des Kohlenstoffs in Süßwasser-Kalkablagerungen // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1959. – V. 16. – № 4. – S. 236–242.
46. Гуцало Л.К. Формирование подземных вод и газов земной коры по изотопным данным: автореф. дис... д-ра. геол.-минерал. наук. – СПб, 1997. – 98 с.
47. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. – М.: Недра, 1968. – 226 с.
48. Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского (Арктические районы Сибирской Платформы) / Д.А. Новиков, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, П.А. Ян // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 157–167.
49. The geologic time scale / F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M. Schmitz, G. Ogg. – Boston: Elsevier, 2012. – 1129 p.
50. Полициклические ароматические углеводороды и изотопы углерода в торфе миграционного бугра пучения (большеземельская тундра) / Ю.К. Васильчук, А.Д. Белик, Н.А. Буданцева, А.Н. Геннадиев, А.К. Васильчук, Дж.Ю. Васильчук, Ю.А. Завгородняя, А.П. Гинзбург, Л.Б. Блудушкина // *Почвоведение*. – 2021. – № 7. – С. 797–805.
51. Jones M.C., Peteet D.M., Sambrotto R. Late-glacial and Holocene  $\delta^{15}N$  and  $\delta^{13}C$  variation from a Kenai Peninsula, Alaska peatland // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2010. – V. 293. – № 1–2. – P. 132–143.
52. Loisel J., Gameau M., Hêlie J.-F. Modern Sphagnum  $\delta^{13}C$  signatures follow a surface moisture gradient in two boreal peat bogs, James bay lowlands, Québec // *Journal Quaternary Science*. – 2009. – V. 24. – P. 209–214.
53. Peat decomposition records in three pristine ombrotrophic bogs in southern Patagonia / T. Broder, C. Blodau, H. Biester, K.H. Knorr // *Biogeosciences*. – 2012. – V. 9. – P. 1479–1491.
54. Стабильные изотопы кислорода, водорода и углерода и возраст палыза близ поселка Елецкий, северо-восток Большеземельской тундры / Н.А. Буданцева, Ю.Н. Чижова, Л.Б. Блудушкина, Ю.К. Васильчук // *Арктика и Антарктика*. – 2017. – № 4. – С. 38–56.
55. Коссова С.А., Дубинина Е.О., Мирошников А.Ю. Применение дейтериевого эксцесса для идентификации источников опреснения в заливах архипелага Новая Земля // *Доклады академии наук*. – 2019. – Т. – 487. – № 2. – С. 212–216.
56. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 116. – 104579.
57. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in cave evolution of drip water along discrete flow paths / P.J. Mickler, P. Carlson, J.L. Banner, D.O. Breecker, L. Stern, A. Guilfoyle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. 244. – P. 182–196.

Поступила: 18.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 08.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Лепкурова О.Е.**, доктор геолого-минералогических наук, 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.

**Иванова И.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

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

UDC 544.02(282.256.615)

## STABLE ISOTOPES OF HYDROGEN, OXYGEN AND CARBON WHEN INTERPRETING FORMATION CONDITIONS OF SURFACE WATER BODIES OF YAMALO-NENETS AUTONOMOUS REGION

Olesya E. Lepokurova<sup>1,2</sup>,  
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Irina S. Ivanova<sup>1</sup>,  
ivanovais\_1986@mail.ru

Aleksandr N. Pyrayev<sup>3,4</sup>,  
pyrayev@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,  
4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia.

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

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

<sup>4</sup> Novosibirsk State University,  
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance.** Stable isotopes are widely used in geochemistry for solving various genetic problems, which is associated with the assumption of the constancy of the original isotopic composition of any element, subsequently changed under the influence of various processes. In the practice of surface water studies, isotope methods are used for solving not only direct genetic problems, but also for various related problems. In arctic regions affected by permafrost, water isotopes are increasingly being used to assess the contribution of melt water to the balance of total river flow, especially in conditions of accelerated melting, which leads to changes in the hydrological regime and the overall structure of the landscape. The analysis of the isotope composition of dissolved inorganic carbon is of particular research interest, since it gives an idea of the participation of organic matter released during the thawing of permafrost peat in isotope exchange with water. The joint use of the chemical and isotopic characteristics of water bodies will make it possible to study in detail the genesis, features of the formation and interaction of these waters with the environment.

**The main aim:** clarification of the genesis and conditions of formation of surface water bodies in the Arctic regions of Western Siberia, subject to the influence of permafrost, using the composition of stable isotopes H, O, C.

**Objects:** surface water bodies of the tundra and forest-tundra natural zones of the Yamalo-Nenets Autonomous Region. Field work took place in August 2020. Water samples for the isotopic composition were taken from three large rivers – Ob, Taz, Pur, and in the right tributary of Pur River – Ngarka-Khadytayakha, 7 large lakes (from 2500 to 300000 m<sup>2</sup>), 1 small thermokarst lake (12 m<sup>2</sup>) and from 3 depressions (the initial stage of formation of thermokarst lakes); and 2 soil cross sections. A total of 17 water samples. In addition, 5 peat samples were taken from one soil cross section from five depth intervals up to 55 cm.

**Methods.** Chemical composition of water was analyzed by standard methods (titration, inductively coupled plasma mass spectrometry, photometry, ion chromatography and high-temperature catalytic oxidation method) at the Problematic Research Laboratory of Hydrogeochemistry of Tomsk Polytechnic University. The study of the isotopic composition of oxygen, hydrogen and carbon of water-dissolved carbon dioxide was carried out in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS using Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253 equipped by H/Device and GasBench II for sample preparation.

**Results.** Isotope composition of oxygen, hydrogen and carbon in waters and dissolved inorganic carbon for surface waters of the tundra and forest-tundra zones of the YaNAO are presented. It is shown that each object (soils, depressions, lakes and rivers) is characterized by individual intervals of  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C$  (dissolved inorganic carbon) values, which indicates different specifics of their formation and allows them to be differentiated. Comparison with the already available data on  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  of atmospheric precipitation, surface water and snow in the region revealed that river and soil waters, in comparison with other water bodies, were formed in colder conditions. The  $\delta^{13}C_{DIC}$  values indicated the presence of two sources of carbon in the surface waters of the region: biogenic (light) and soil diffusion, which inherits the isotopic composition of the atmosphere (heavy). The first one dominates in soil waters, depressions, shallow lakes and, apparently, in stagnant river waters. In large lakes and in the active course of the river, soil diffusion CO<sub>2</sub> is more pronounced. The effect of permafrost thawing in the region is demonstrated by lighter  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values (thawed waters), as well as by lighter  $\delta^{13}C_{DIC}$  values (additional biogenic carbon is released from soils and peat). A scheme of possible distribution and exchange of stable isotopes H, O and C in natural waters and dissolved inorganic carbon for investigated region was developed. The obtained results can be used for determining genesis of the region natural waters; for clarifying conditions of waters and dissolved inorganic carbon formation; for identifying permafrost degradation processes and evaluating its rate; for paleoclimate reconstructions etc.

### Key words:

Surface waters, peat, stable isotopes of carbon, hydrogen, oxygen, arctic regions, Yamalo-Nenets Autonomous Region, genesis, permafrost.

The research was financially supported by the RSF no. 20-77-10084 and the project of the fundamental scientific researches of the Russian Academy of Sciences no. 0266-2022-0016.

## REFERENCES

- Rankama K. *Isotopy v geologii* [Isotopes in geology]. Translated from English by I.D. Bepalova. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literaturny publ., 1956. 464 p.
- Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. 9<sup>th</sup> ed. Switzerland, Springer Nature AG, 2021. 528 p.
- Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F., Pyrayev A.N., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters «In-skie springs» (south-western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 135–145. In Rus.
- Li T.N., Rao W.B., Tan H.B., Li Y.W., Tan T. Identifying the moisture source of atmospheric precipitation in a typical alpine river watershed using stable H-O isotopes and HYSPLIT model. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, 346.
- Abdeldjebbar T., Mohammed H., Messoud H. Origin and age of the surface water and groundwater of the Ouargla basin-Algeria. *Energy Procedia*, 2019, vol. 157, no. 2018, pp. 111–116.
- Chizhova Yu.N., Dobrolyubov S.A., Budantseva N.A., Surkova G.V., Mukhametov S.S., Myslenkov S.A., Vasilchuk Yu.K. Isotopic estimation of the influence zone of small rivers on the Black Sea surface waters. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya Geografiya*, 2011, no. 6, pp. 54–59. In Rus.
- Stroganova T.A., Prasolov E.M. Isotope composition of ground and surface waters of the Lammin-suo swamp massif (Leningrad region). *Regional Geology and Metallogeny*, 2019, no. 77, pp. 20–26. In Rus.
- Wang B.L., Zhang H.T., Liang X., Li X.D., Wang F.S. Cumulative effects of cascade dams on river water cycle: Evidence from hydrogen and oxygen isotopes. *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 568, pp. 604–610.
- Babka B., Futo I., Szabo S. Seasonal evaporation cycle in oxbow lakes formed along the Tisza River in Hungary for flood control. *Hydrological processes*, 2018, vol. 32, no. 13, pp. 2009–2019.
- Borzenko S.V. Isotopic composition of waters in salt lakes of Eastern Transbaikalia. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 488, no. 1, pp. 1089–1093. In Rus.
- Li X., Tang Ch., Cao Y., Li D. A multiple isotope (H, O, N, C and S) approach to elucidate the hydrochemical evolution of shallow groundwater in a rapidly urbanized area of the Pearl River Delta, China. *Science of Total Environment*, 2020, vol. 724, 137930 p.
- Paulsson O., Widerlund A. Pit lake oxygen and hydrogen isotopic composition in subarctic Sweden: A comparison to the local meteoric water line. *Applied geochemistry*, 2020, vol. 118, 104611 p.
- Thomas E.K., Hollister K.V., Cluett A.A., Corcoran M.C. Reconstructing Arctic precipitation seasonality using aquatic leaf wax  $\delta^2\text{H}$  in lakes with contrasting residence times. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2020, vol. 35, no. 7, 2020PA003886 p.
- Katrantsiotis C., Norstrom E., Smittenberg R.H., Salonen J.S., Pliikk A., Helmens K. Seasonal variability in temperature trends and atmospheric circulation systems during the Eemian (Last Interglacial) based on n-alkanes hydrogen isotopes from Northern Finland. *Quaternary science reviews*, 2021, vol. 273, 107250 p.
- Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C. Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation. *Water Research*, 2007, vol. 43, W03406 p.
- Tokarev I.V. The use of isotope data ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) in the study of permafrost degradation processes as a result of long-term climate variations. *Zapiski Gornogo instituta*, 2008, vol. 176, pp. 191–195. In Rus.
- Thomas E.K., Castaneda I.S., Mckay N.P., Briner J.P., Salacup J.M., Nguyen K.Q., Schweinsberg A.D. A wetter Arctic coincident with hemispheric warming 8,000 years ago. *Geophysical research letters*, 2018, vol. 45, no. 19, pp. 10637–10647.
- Mellat M., Bailey H., Mustonen K.R., Marttila H., Klein E.S., Gribanov K., Bret-Harte M.S., Chupakov A.V., Divine D.V., Else B., Filippov I., Hyöky V., Jones S., Kirpotin S.N., Kroon A., Markussen H.T., Nielsen M., Olsen M., Paavola R., Pokrovsky O.S., Prokushkin A., Rasch M., Raundrup K., Suominen O., Syvänäperä I., Vignissou S.R., Zarov E., Welker J.M. Hydroclimatic controls on the isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ , d-excess) traits of pan-Arctic summer rainfall events. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9, 651731 p.
- Ala-Aho P., Soulsby C., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S.N., Manasyrov R.M., Loiko S., Tetzlaff D. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 556, pp. 279–293.
- Vasilchuk Yu.K., Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Budantseva N.A., Vorobyov S.N., Kirpotin S.N., Kritskov I.V., Manasyrov R.M., Pokrovsky O.S., Chizhov Yu.N. Oxygen isotope and deuterium composition of the snow cover of Western Siberia on the profile from Tomsk to the Gulf of Ob. *Reports of the Academy of Sciences*, 2016, vol. 471, no. 5, pp. 590–594. In Rus.
- Ivanova I.S., Savichev O.G., Trifonov N.S., Kolubaeva Yu.V., Volkova N.A. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of Northern West Siberia. *Water*, 2021, vol. 13, 3107 p.
- Soldatova E.A., Ivanova I.S., Kolubaeva Yu.V., Sokolov D.A. Features of the formation of the chemical composition of surface water in the arctic territories of western Siberia. *Geochemistry*, 2022, vol. 67, no. 11, pp. 1142–1156. In Rus.
- Ivanova I.S., Kolubaeva Yu.V. Tyazhelye metally v ognevnykh vodakh Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga [Heavy metals in the surface waters of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]. *Novye vyzovy fundamentalnoy i prikladnoy geologii nefii i gaza - XXI vek. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [New challenges of fundamental and applied geology of oil and gas – XXI century. Proc. of the All-Russian scientific conference]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2021. pp. 67–70.
- Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Trifonov N.S., Kolubaeva Y.V., Sokolov D.A. Dissolved forms of migration of humic substances in surface water bodies of the Yamal-Nenets autonomous district. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 56–69. In Rus.
- Zakharova E.A., Kouraev A.V., Rémy F., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Seasonal variability of the Western Siberia wetlands from satellite radar altimetry. *Journal of hydrology*, 2014, vol. 512, pp. 366–378.
- Shamilishvili G.A., Abakumov E.V., Pechkin A.S. Features of soil cover of the Nadym region, Yamal-Nenets autonomous district. *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District*, 2016, no. 4, pp. 12–16. In Rus.
- Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii vodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu»* [State report «On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2018»]. Moscow, NIA-Priroda Publ., 2019. 290 p.
- Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M. A first pan-Arctic assessment of the influence of glaciation, permafrost, topography and peatlands on northern hemisphere lake distribution. *Permafrost Periglacial Processes*, 2007, vol. 18, pp. 201–208.
- Epstein S., Mayeda T. Variation of  $\text{O}^{18}$  content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, vol. 4, no. 5, pp. 213–224.
- Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2000, no. 4, pp. 1044–1046.
- Górka M., Sauer P.E., Lewick a-Szczebak D., Jedrysek M.O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, pp. 294–301.
- Evans M.N., Selmer K.J., Breeden B.T. III, Lopatka A.S., Plummer R.E. Correction algorithm for online continuous flow  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  carbonate and cellulose stable isotope analyses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, vol. 17, pp. 3580–3588.
- Ogawa N.O., Nagata T., Kitazato H., Ohkouchi N. Ultra-sensitive elemental analyzer/isotope ratio mass spectrometer for stable nitrogen and carbon isotope analyses. *Earth, Life, and Isotopes*, 2010, pp. 339–353.
- Reference products for environment and trade*. Available at: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (accessed 17 October 2022).
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, vol. 19, pp. 435–463.
- Kopec B.G., Feng X., Posmentier E.S., Songer L.J. Seasonal deuterium excess variations of precipitation at summit, Greenland, and their climatological significance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, vol. 124, pp. 72–91.

37. Benetti M., Reverdin G., Pierre C., Merlivat L., Risi C., Steen-Larsen H. Ch., Vimeux F. Deuterium excess in marine water vapor: Dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, vol. 119, pp. 584–593.
38. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
39. Craig H. Isotopic composition and origin of the Red Sea and Saltton Sea geothermal brines. *Science*, 1966, vol. 154, pp. 1544–1548.
40. Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery Zemli* [Isotops of the Earth's hydrosphere]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2009. 632 p.
41. Pyrayev A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A. Stable isotopes as a tool to check the boundaries of closed ecosystems, by the example of the Vitim river basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 148–157. In Rus.
42. Gat J.R., Matsui E. Atmospheric water balance in the Amazon basin: an isotopic evapotranspiration model. *Journal of geophysical research*, 1991, vol. 96, no. D7, pp. 13179–13188.
43. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 210, 106445 p.
44. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO<sub>2</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 1, pp. 107–114.
45. Vogel J.C. Über den Isotopengehalt des Kohlenstoffs in Süßwasser-Kalkablagerungen [On the isotopic content of carbon in freshwater limestone deposits]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1959, vol. 16, no. 4, pp. 236–242.
46. Gutsalo L.K. *Formirovanie podzemnykh vod i gaza v zemnoy kore po izotopnym dannym*. Avtoreferat Dis. Doct. nauk [Formation of underground waters and gases of the earth's crust according to isotope data. Dr. Diss. Abstract]. St. Petersburg, 1997. 98 p.
47. Galimov E.M. *Geokhimiya stabilnykh izotopov ugleroda* [Geochemistry of stable carbon isotopes]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 226 p.
48. Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyrayev A.N., Yan P.A., First isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the southeast slope of the Chekanovsky ridge (arctic areas of the Siberian platform). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11 pp. 157–167. In Rus.
49. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M., Ogg G. *The geologic time scale*. Boston, Elsevier, 2012. 1129 p.
50. Vasilchuk Yu.K., Belik A.D., Budantseva N.A., Gennadiev A.N., Vasilchuk A.K., Vasilchuk J.Yu., Zavgorodnyaya Yu.A., Ginzburg A.P., Bludushkin L.B. Polycyclic aromatic hydrocarbons and carbon isotopes in peat of a migratory heaving mound (Bolshezemelskaya tundra). *Soil Science*, 2021, no. 7, pp. 797–805.
51. Jones M.C., Peteet D.M., Sambrotto R. Late-glacial and Holocene  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  variation from a Kenai Peninsula, Alaska peatland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, vol. 293, no. 1–2, pp. 132–143.
52. Loisel J., Garneau M., Hélie J.-F. Modern Sphagnum  $\delta^{13}\text{C}$  signatures follow a surface moisture gradient in two boreal peat bogs, James bay lowlands, Québec. *Journal Quaternary Science*, 2009, vol. 24, pp. 209–214.
53. Broder T., Blodau C., Biester H., Knorr K.H. Peat decomposition records in three pristine ombrotrophic bogs in southern Patagonia. *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, pp. 1479–1491.
54. Budantseva N.A., Chizhova Yu.N., Bludushkina L.B., Vasilchuk Yu.K. Stable isotopes of oxygen, hydrogen, and carbon and the age of the palsian near the village of Eletsy, northeast of the Bolshezemelskaya tundra. *Arktika i Antarktika*, 2017, no. 4, pp. 38–56. In Rus.
55. Kossova S.A., Dubinina E.O., Miroshnikov A.Y., Flint M.V. Application of deuterium excess for identification of freshwater sources in the bays of Novaya Zemlya archipelago. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 487, no. 1, pp. 827–830. In Rus.
56. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, 104579 p.
57. Mickler P.J., Carlson P., Banner J.L., Breecker D.O., Stern L., Guilfoyle A. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in-cave evolution of drip water along discrete flow paths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 244, pp. 182–196.

Received: 18 January 2023.

Reviewed: 8 February 2023.

#### Information about the authors

**Olesya E. Lepokurova**, Dr. Sc., leading researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Irina S. Ivanova**, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS.

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

УДК 532.546

## ДВИЖЕНИЕ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИИ ВДОЛЬ НЕСВЯЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО ТЕЛА

Таирова Алия Алиевна<sup>1</sup>,  
moscouposte@gmail.com

Беляков Георгий Васильевич<sup>1</sup>,  
m5184@yandex.ru

Юдочкин Никита Анатольевич<sup>1</sup>,  
good818181@yandex.ru

<sup>1</sup> Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской Академии наук,  
Россия, 119334 г. Москва, Ленинский пр., 38-1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью изучения механизмов взаимодействия фильтрационного потока с трещиноватой породой и изменения ее механических параметров при раскрытии больших нефтесъемных поверхностей, которые являются стенками трещины гидроразрыва пласта. При развитии трещины происходит переупаковка или разрушение частиц скелета, что может приводить к снижению проницаемости образующейся поверхности, а также к изменению направления трещины.

**Цель** данного исследования заключается в визуализации на физической модели распространения фильтрационного фронта вдоль несвязной поверхности пористого тела и изменения напряженно-деформированного состояния скелета.

**Объект:** пороупругие породы нефтесодержащего пласта

**Методы:** лабораторные исследования по определению скорости распространения кончика «трещины» в результате фильтрации вязкой жидкости при различных перепадах давления и напряженно-деформированных состояниях скелета.

**Результаты.** Получена визуальная картина взаимодействия вязкой жидкости с пороупругим скелетом при различных параметрах пористой среды и давления закачки. Предложена аналитическая зависимость для представленной модели, показывающая, что относительная ширина «трещины» зависит от упругих параметров и начального размера пористого массива, давления нагнетаемой жидкости и коэффициента трения его о «подшву» и «кровлю». Результаты экспериментов показали, что раскрытие сомкнутых несвязных поверхностей пористого массива, моделирующих трещину, носит неустойчивый характер. Скорость распространения носика «трещины» зависит от угла ее раскрытия. В ходе экспериментов было замечено, что при раскрытии «трещины» массив непосредственно за стенками и сжимается, в результате чего уменьшается проницаемость скелета. Таким образом, вся жидкость устремляется к носику, тем самым увеличивая длину «трещины».

### Ключевые слова:

напряженно-деформированное состояние, пористая среда, фильтрация жидкости, носик трещины, фильтрационный фронт, упругость среды.

### Введение

Фильтрация флюидов в горной породе может сопровождаться изменением напряженно-деформированного состояния массива, и в результате повлечь за собой нарушение его сплошности, что может приводить к образованию трещин или возникновению сейсмических событий [1–3]. Например, в высокопористых и трещиноватых породах продвижение фильтрационного фронта может сопровождаться сжатием скелета, с последующим изменением проницаемости. Если отток в стенки трещины уменьшается или отсутствует вовсе, то давление жидкости направлено на поверхность стенок, на их раздвижение и перемещение ее кончика. Зарождение в горном массиве трещин может приводить к изменению напряженно-деформированного состояния и его полному или частичному разрушению. Возможны ситуации, когда трещины стабилизируются, однако в любом случае изменение напряженно-деформированного состояния массива может способствовать их росту. Вопрос о возможности контроля и последующего влияния напряжений на развитие трещины особенно актуален для техногенных процессов, таких как извлечение углеводородов.

Для повышения эффективности добычи нефти скважинным способом применяют метод гидравлического разрыва нефтеносного пласта. С этой целью в скважину, входящую в нефтяной пласт, закачивают технологическую жидкость. По мере закачки давление в забойной зоне скважины растет, и при достижении некоторого критического значения в пласте возникает трещина. С появлением трещин увеличивается расход жидкости. Размер трещины растет, обнажая новые поверхности нефтесодержащей породы. Первые исследования, посвященные разработке теории гидроразрыва, проведены С.А. Христиановичем и Ю.П. Желтовым [4], а затем в работе [5].

В исследованиях [5–8] проведен анализ геометрии и условий существования равновесных трещин. Областью движения жидкостей в объемах трещин считается интервал от места ввода жидкости в трещину до фронта, определяемого местом нахождения переднего кончика трещины [9–11]. При этом концепция отставания жидкости от кончика трещины являлась важным элементом механики движения щели. К недостаткам модели относится навязанная условием постоянства высоты трещины ее эллиптическая форма щели. В работе [12] приведен анализ области около носика трещины ГРП в насыщенной среде, учитывая ва-

ются два диссипативных процесса: трещиностойкость породы и течение вязкой жидкости, с утечками и без. Двумерная модель трещины ГРП, распространяющаяся в высокопроницаемой породе, рассматривается в [13]. Решение показывает, что нагнетаемое давление не изменяется монотонно и его пиковое значение соответствует не разрыву, а переходу между двумя режимами течения в пористой среде. Пороупругость влияет на реакцию системы за счет увеличения давления закачки и временную задержку пика давления. Для объяснения аномального пика давления при нагнетании в очень проницаемые, слабоконсолидированные породы, где образуется «двукрылая» трещина, была построена математическая модель на основе пороупругости и теории смазки. [14]

Определение направления развития трещины в неоднородной горной породе при помощи акустической эмиссии рассматривается в ряде экспериментальных работ [15–19]. Измерение длины трещины в различных образцах горной породы при помощи ультразвука показало, что сухой носик трещины опережает фронт фильтрации. Длина сухого носика трещины зависит от всестороннего сжатия, с увеличением напряжения это расстояние уменьшалось [20]. Затухание медленных волн рассмотрено в трещине, представленной плоским каналом, заполненным жидкостью, который образован между двух твердых тел [21]. Увеличение жесткости стенок трещины показало более высокую фазовую скорость и большее затухание, введение твердых частиц в трещину приводит к снижению фазовой скорости и к большему затуханию. Еще одно исследование [22], исключающее отток в стенки трещины, рассматривает развитие множественных трещин ГРП от горизонтальных скважин, когда рост одних трещины подавляет развитие других. Порода моделируется оргстеклом. Исследование распространения трещины в образце илестой глины, в который закачивался глицерин, показало, что на формы записей давления заметно влияло содержание воды в почве: увеличение содержания воды уменьшало давление, необходимое для инициирования гидравлического разрыва (и уменьшало вязкость разрушения), и выравнивало запись давления во время ее распространения [23]. Взаимодействие фильтрационного потока с пороупругим скелетом рассматривается в работах [24, 25].

В предлагаемой работе на основе физического эксперимента методом визуализации рассматривается распространение фильтрационного фронта вдоль несвязной поверхности пористого тела, где скелет ограничен непроницаемыми «подшовой» и «кровлей». Сомкнутые несвязные поверхности пористого тела имитируют предварительно созданную «трещину» в высокопроницаемых породах.

### Эксперимент

Основным параметром, определяющим возникновение трещин, является степень деформации пористого массива

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{p}{E}$$

под действием силы  $p$  с модулем

упругости пласта  $E$  и  $l_0$  – начального размера сжимаемой части среды. Например, на нефтяных месторождениях рабочим телом, которое вызывает деформацию массива, является жидкость с давлением  $p \sim 10^7$  Па, вязкостью  $\eta \sim 10^2$  г/см·с и модулем Юнга вмещающей породы  $\sim 10^{11}$  Па, шириной пласта  $\sim 10^3$  см.

В настоящей работе на физической модели рассматривается формирование и движение раскрывающихся трещин в сжимаемых проницаемых массивах. Моделями пористых массивов выбраны листы сжимаемого и проницаемого поролон. Параметры листов и рабочей жидкости приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры эксперимента

Table 1. Experiment parameters

Пористая среда/Porous medium	Поролон Rubber foam
Начальная толщина, см/Initial thickness, cm	0,5
Коэффициент Пуассона/Poisson's coefficient	0,1
Модуль упругости, Па/Young's modulus, Pa	$0,8-2 \cdot 10^4$
Проницаемость, Да/Permeability, Da	$10^3$
Коэффициент трения о стекло/Friction coefficient	0,15
Пористость/Porosity	0,98
Рабочая жидкость/Liquid	Глицерин Glycerine
Вязкость, г/см·с/Viscosity, g/cm·c	8
Плотность, г/см <sup>3</sup> /Density, g/cm <sup>3</sup>	1,2
Давление, атм/Pressure, atm	0,11–0,4
Данные с месторождений/Field data	
Модуль упругости пласта, Па Coefficient of elasticity, Pa	$-10^{10}-10^{11}$
Давление жидкости, Па/Pressure of liquid	$\sim 10^7$
Горизонтальная протяженность пласта, см Formation initial size, cm	$-6 \cdot 10^4$
Ширина трещины, мм/Fracture opening, mm	$\sim 1-10$

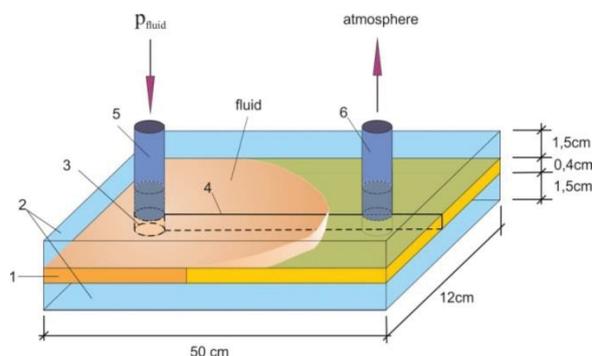


Рис. 1. Схема установки: 1 – пористый материал; 2 – стеклянные пластины; 3 – открытый ствол скважины; 4 – предварительный разрез; 5 – входное отверстие; 6 – выходное отверстие

Fig. 1. Scheme of experimental setup: 1 – porous material; 2 – glass plates; 3 – open well bore; 4 – previous cut; 5 – inlet; 6 – outlet

Начальная толщина листов поролон 0,5 см, площадь листов 12×50 см. Листы располагались между плоскими прозрачными стеклами толщиной 1,5 см. Стекла служили моделями непроницаемых «подшовой» и «кровли» нефтяного пласта. Вблизи середины «кровли» находилось отверстие – аналог открытого ствола скважины, входящей в нефтяной пласт. Жидкость под давлением поступала во входное отверстие,

имитирующее скважину, затем фильтровалась через ячейку и удалялась через выходное отверстие. Давление жидкости измерялось на входе в ячейку. Процесс образования и развития трещины регистрировался видеокамерой. Поток жидкости, подаваемой в скважину, совершал работу над силами упругого сжатия материала пласта и силами трения пласта о поверхности «кровли» и «подшвы». Чтобы исключить поглощение энергии потока жидкости при разрыве пласта делался сквозной разрез на всю его длину. В практической технологии нефтедобычи аналогом предварительного разреза пласта является минигидроразрыв, которым только намечается начало будущей рабочей трещины. Концентрация напряжений на концах минитрещины ведет к значительной потере энергии на разрыв пласта и, как следствие, к развитию основного гидроразрыва при гораздо меньших параметрах потока жидкости.

#### Результаты эксперимента и их анализ

Видеокамерой зафиксированы моменты движения раскрывающейся щели в поролоне толщиной 0,4 см и начальной проницаемостью  $k: 10^{-6} \text{ см}^2$  (рис. 2). Рабочей жидкостью, раскрывающей щель, является глицерин с давлением  $\Delta p$  на входе в пласт 0,11; 0,25; 0,4 атм. При наименьшем давлении (0,11 атм) щель не раскрывалась, а скорость вытеснения воздуха из ячейки со временем убывала в соответствии с формулой вытеснения по закону фильтрации Дарси

$$v = \sqrt{\frac{k\Delta p}{2\eta}} \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (\text{рис. 2}).$$

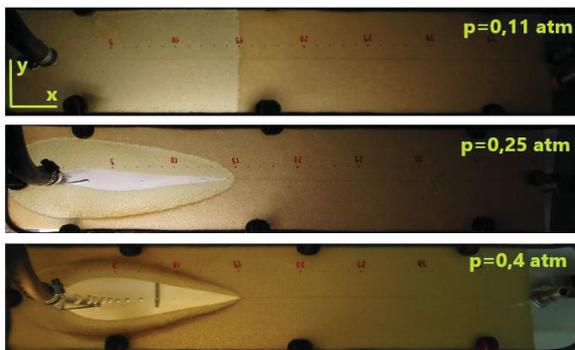


Рис. 2. Образование и развитие трещины при различных нагнетаемых давлениях

Fig. 2. Fracture formation and propagation under different pressure of liquid

С увеличением давления жидкости  $p > 0,11$  атм на входе в ячейку проявляется ранее сделанный продольный разрез поролона, визуализируемый раскрываемой трещиной. Амплитуда раскрытия увеличивается с ростом давления в жидкости [8], а также с возникновением сжатой области за стенками трещины. Снижение начальной проницаемости поролона сжатием его между стеклами примерно в два и более раза ведет к уменьшению скорости распространения носика трещины (рис. 3), которая со временем приобретает колебательный неустойчивый характер. Также

уменьшение оттока в стенке, в результате снижения проницаемости, ведет к увеличению раскрытия стенок трещины [26].

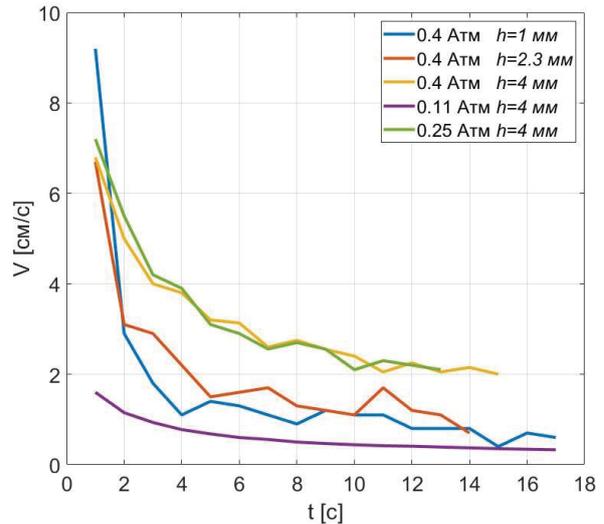


Рис. 3. Скорость трещины при различных проницаемостях и перепадах давления. Зеленым цветом приведена скорость фильтрации жидкости при не образованной трещине

Fig. 3. Fracture propagation velocity at various permeability and pressure drops. The green color shows the fluid filtration rate, with no crack formed

Предположительно, неустойчивость движения «жидкого» носика трещины определяется возникновением возмущения от границы соприкосновения сред с разными вязкостями и проницаемостями [15].

Скорость течения несжимаемой жидкости у входа в носик трещины подчиняется закону Дарси

$$u = -\frac{k}{\eta} \nabla p \quad \text{с потенциалом течения } \varphi = -\frac{k}{\eta} p.$$

Полагая, что возмущенная поверхность носика трещины может быть представлена слабой волнистостью с амплитудой  $a$  и волновым числом  $n = \frac{2\pi}{\lambda}$ , возмущенное движение жидкости принимает вид  $x = ae^{iny + \sigma t}$ .

На поверхности раздела сред у носика трещины давление слева и давление справа от возмущенной границы

$$(x=0) \text{ равны } -\frac{\eta_1}{k_1} \varphi_1 = -\frac{\eta_2}{k_2} \varphi_2.$$

Из решения уравнения Лапласа  $\Delta \varphi = 0$  и условия равенства давлений на границе раздела сред ( $x=0$ ) следует, что

$$\frac{\eta_1}{k_1} ae^{iny + \sigma t} (V + \frac{\sigma}{n}) = \frac{\eta_2}{k_2} ae^{iny + \sigma t} (V - \frac{\sigma}{n}),$$

где  $V$  – невозмущенная скорость потока жидкости вдоль направления  $x$ . Выделяя из решения уравнений фактор неустойчивости  $\sigma$ , следует

$$\sigma \sim V \cdot n \left( \frac{k_1 - k_2 \frac{\eta_1}{\eta_2}}{k_1 + k_2 \frac{\eta_1}{\eta_2}} \right). \quad (1)$$

В процессе перемещения носика трещины смена знака фактора неустойчивости (1) означает изменение со временем знака ускорения течения. Причиной смены знака является увеличение или уменьшение угла раскрытия трещины, который определяет расход жидкости и ее проницаемость  $k_1$  в направлении распространения носика трещины.

Поток жидкости, просачиваясь между непроницаемыми кровлей и подошвой в пористый пласт, спрессовывает его фильтрационным давлением  $p$ . Из теории упругости следует, что под действием фильтрационного давления  $p$  вдоль оси  $z$  относительное сжатие на пласт между неподвижными стеклянными стенками:

$$u_{zz} = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{E(1 - \mu)} p,$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона. От сжатия пласта на стеклянных стенках (на подошве и кровле) возникают перпендикулярные им упругие поперечные напряжения (в направлении  $x$ ):

$$\sigma_{xx} = p \frac{\mu}{1 - \mu}$$

и соответствующая им сила трения:

$$f_{тр} = 2p\beta \frac{\mu}{1 - \mu},$$

где  $\beta$  – коэффициент трения. Условие равновесия сил трения и напряжения в скелете приводит к соотношению:

$$2p \frac{\mu}{1 - \mu} \beta = \frac{E(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - \mu)} \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Относительное сжатие пористого массива и соответствующий ему поперечный размер трещины:

$$\Delta l = \frac{2p\beta\mu}{E} l_0. \quad (2)$$

Таким образом, при условии, что давление жидкости превосходит модуль упругости пористой среды на порядок, образуется устойчивая трещина, не требующая дальнейшего закрепления. Оценки поперечного размера трещины в представленной модели (2) и данные, полученные экспериментально, приведены в табл. 2.

### Заключение

Авторами была создана физическая модель и разработана методика проведения экспериментов с целью изучения фильтрации флюида вдоль несвязной поверхности пористого массива при различных его параметрах и давлениях закачки. Особенностью установки

являлось то, что она позволяла в режиме реально времени наблюдать движение фильтрационного фронта и изменение напряженно-деформированного состояния скелета.

**Таблица 2.** Ширина раскрытия трещины при различных зазорах ячейки и давлении жидкости

**Table 2.** Fracture opening width at different cell gap and fluid pressure

Зазор между пластинами, мм Gap between plates, mm	Давление жидкости, атм Fluid pressure, atm	Ширина раскрытия трещины, мм Fracture opening width, mm	
		Эксперимент Experiment	Оценки Calculation
4	0,4	60	60
4	0,25	30	38
4	0,11	–	5
2,3	0,4	50	14
1	0,4	15	9,5

Результаты экспериментов показали, что раскрытие сомкнутых несвязных поверхностей пористого массива носит неустойчивый характер. Скорость распространения носика «трещины» зависит от его угла раскрытия.

Предложена аналитическая зависимость (2) для представленной модели, показывающая, что относительная ширина «трещины» зависит от упругих параметров и горизонтальной протяженности пористого массива, давления нагнетаемой жидкости и коэффициента трения его о «подошву» и «кровлю». Сравнительные оценки поперечного размера трещины по формуле и эксперименту приведены в табл. 2.

По данным одной из скважин, расположенных на нефтяных месторождениях Западной Сибири, давление гидроразрыва на глубине скважины 2,8 км составляет: на дневной поверхности  $p_0 \sim 306$  атм плюс на глубине 2,8 км давление гидростатическое  $\sim 280$  атм, суммарное давление, приводящее к гидроразрыву  $\sim 586$  атм. Полагая, что горизонтальная протяженность нефтяного пласта  $l_0$  составляет  $\sim 6 \cdot 10$  м, а величина  $\beta\mu \cdot 10^{-2}$ , модуль Юнга пласта  $E \sim \rho \cdot g \cdot h^2 = 3 \cdot 10^{10}$  Па, предполагаемая ширина трещины будет  $\Delta l \sim 7$  мм, тогда как средняя ширина закрепленного проппанта в трещине для данной скважины  $\sim 6,5$  мм. Таким образом, модель, представленная в данной работе, согласуется с технологическими процессами, происходящими при гидроразрыве нефтяного пласта, и может быть использована при оптимизации данного метода.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hydraulic fracturing induced seismicity. Reviews of Geophysics / R. Schultz, R.J. Skoumal, M.R. Brudzinski, D. Eaton, B. Baptie, W. Ellsworth. – 2020. – 58. – e2019RG000695. URL: <https://doi.org/10.1029/2019RG000695> (дата обращения 01.11.2022).
2. Fluid-injection-induced earthquakes characterized by hybrid-frequency waveforms manifest the transition from aseismic to seismic slip / H. Yu, R.M. Harrington, H. Kao et al. // Nat Commun. – 2021. – 12. – 6862. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26961-x> (дата обращения 01.11.2022).
3. How to reduce fluid-injection-induced seismicity / A. Zang, G. Zimmermann, H. Hofmann et al. // Rock Mech Rock Eng. –

2019. – 52. – P. 475–493. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1467-4> (дата обращения 01.11.2022).
4. Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР. ОТН. – 1955. – № 5. – С. 3–41.
  5. Geertsma J., De Klerk F. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures // J. Petrol. Tech. – 1969. – № 12. – P. 1571–1581.
  6. Sneddon I., Lowengrub M. Crack problems in the classical theory of elasticity. – NY: John Wiley & Sons, 1969. – 221 p.
  7. Nordgren R.P. Propagation of a vertical hydraulic fracture // SPE J. – 1972. – V. 12. – № 4. – P. 306–314.
  8. Седов Л.И. Механика сплошных сред. – М.: Лань, 2004. – Т. 2. – 560 с.
  9. Акулич А.В., Звягин А.В. Численное моделирование распространения трещины гидроразрыва // Вестник Московского университета Математика. Механика. – 2008. – № 1. – С. 43–49.
  10. The crack tip region in hydraulic fracturing / J. Desroches, E. Detournay, B. Lenoach et al. // Proc. Royal Soc. A. – 1994. – V. 447. – P. 39–48.
  11. Perkins T.K., Kern L.R. Widths of hydraulic fractures // J. Petrol. Tech. – 1961. – № 9. – P. 937–949.
  12. Garagash D., Detournay E., Adachi J. Multiscale tip asymptotics in hydraulic fracture with leak-off // Journal of Fluid Mechanics. – 2011. – V. 669. – P. 260–297. DOI: 10.1017/S002211201000501X
  13. Gao Y., Detournay E. Hydraulic fracture induced by water injection in weak rock // Journal of Fluid Mechanics. – 2021. – V. 927. – A19. DOI: 10.1017/jfm.2021.770
  14. Yue Gao, Detournay E. A poroelastic model for laboratory hydraulic fracturing of weak permeable rock // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2020. – V. 143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104090> (дата обращения 01.11.2022).
  15. Tensile failure and fracture width of partially permeable wellbores with applications in lost circulation material design / K. Nguyen, A. Mehrabian, A. Santra, P. Dung // SPE J. – 2022. – V. 27. – P. 465–487. DOI: <https://doi.org/10.2118/204585-PA>
  16. Response characteristics of coal subjected to hydraulic fracturing: an evaluation based on real-time monitoring of borehole strain and acoustic emission / Y. Liang, Y. Cheng, Q. Zou, W. Wang, Y. Ma, Q. Li // J. Nat. Gas Sci. Eng. – 2017. – V. 38. – P. 402–411.
  17. Stanchits S., Burghardt J., Surdi A. Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission // Rock Mech. Rock Eng. – 2015. – V. 48. – P. 2513–2527.
  18. Chen Y., Nagaya Y., Ishida T. Observations of fractures induced by hydraulic fracturing in anisotropic granite // Rock Mech. Rock Eng. – 2015. – V. 48. – P. 1455–1461.
  19. Fracture propagation in sandstone and slate – laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics / F. Stoeckhert, M. Molenda, S. Brenne, M. Alber // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2015. – V. 7. – Iss. 3. – P. 237–249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.011> (дата обращения 01.11.2022).
  20. Medlin W.L., Massé L. Laboratory experiments in fracture propagation // SPE J. – 1984. V. 24. – P. 256–268. DOI: <https://doi.org/10.2118/10377-PA>
  21. Nakagawa S., Nakashima S., Korneev V.A. Laboratory measurements of guided-wave propagation within a fluid-saturated fracture // Geophysical Prospecting. – 2016. – V. 64. – P. 143–156. URL: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12223> (дата обращения 01.11.2022).
  22. Gunaydin D., Peirce A.P., Bungler A.P. Laboratory experiments contrasting growth of uniformly and non-uniformly spaced hydraulic fractures // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2021. – V. 126. – e2020JB020107. URL: <https://doi.org/10.1029/2020JB020107> (дата обращения 01.11.2022).
  23. Murdoch L.C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. P. 2. Propagation // Geotechnique. 1993. – V. 43. – P. 267–276.
  24. Образование трещины в неоднородной порупругой среде / Г.В. Беляков, А.А. Таирова, Н.А. Юдочкин, Т.М. Торрес // Динамические процессы в геосферах. – 2021. – № 13. – С. 60–63. DOI: 10.26006/22228535\_2021\_1\_60. EDN PGYNHM.
  25. Фильтрация жидкости в среде с переменной проницаемостью / Т.М. Торрес, Н.А. Юдочкин, А.А. Таирова, Г.В. Беляков // Динамические процессы в геосферах. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 52–61. DOI: 10.26006/29490995\_2022\_14\_2\_52. EDN QAZFHU.
  26. Saffman P.G., Taylor G.I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1958. – V. 245. – Iss. 1242. – P. 312–329. URL: <http://doi.org/10.1098/rspa.1958.0085> (дата обращения 01.11.2022).

Поступила: 17.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 02.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Таирова А.А.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики и флюидодинамики Института динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской Академии наук.

**Беляков Г.В.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики и флюидодинамики Института динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской Академии наук.

**Юдочкин Н.А.**, младший научный сотрудник лаборатории геомеханики и флюидодинамики Института динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской Академии наук.

УДК 532.546

## FILTRATION WAVE MOVEMENT ALONG THE NON-COHESIVE SURFACE OF A POROUS BODY

Aliya A. Tairova<sup>1</sup>,  
lmoscouposte@gmail.com

Georgiy V. Belyakov<sup>1</sup>,  
m5184@yandex.ru

Nikita A. Iudochkin<sup>1</sup>,  
rood818181@yandex.ru

<sup>1</sup> Institute of Geosphere Dynamics Russian Academy of Science,  
38-1, Leninsky avenue, Moscow, 119334, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to study the mechanisms of interaction of the filtration flow with fractured rock and changes in its mechanical parameters when opening large oil-removing surfaces, which are the walls of a hydraulic fracture. With the development of a crack, repacking or destruction of the particles of the skeleton occurs, which can lead to decrease in resulting surface permeability, as well as to the change in crack direction.

**The main aim** of this study is to visualize the distribution of the filtration front along the non-cohesive surface of a porous body and the change in the stress-strain state of the skeleton on a physical model.

**Object:** poroelastic rocks of an oil-bearing formation.

**Methods:** laboratory studies to determine the rate of propagation of the «crack» tip as a result of filtration of a viscous liquid at various pressure drops and stress-strain states of the skeleton.

**Results.** A visual picture of viscous fluid interaction with a poroelastic skeleton was obtained for various parameters of the porous medium and injection pressure. The authors have proposed the analytical dependence for the presented model, showing that the relative width of the «crack» depends on the elastic parameters and the initial size of the porous mass, the pressure of the injected fluid, and its coefficient of friction against the «bottom» and «roof». The results of the experiments showed that the opening of closed non-cohesive surfaces of porous mass, simulating a crack, is unstable. The rate of propagation of the «fracture» tip depends on the angle of its opening. During the course, it was noticed that when the «crack» opens, the mass immediately behind the walls is compressed, as a result of which the permeability of the skeleton decreases. Thus, all the liquid rushes to the tip, thereby increasing the length of the «fracture».

### Key words:

stress-strain state, porous medium, fluid filtration, crack tip, filtration front, medium elasticity.

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No 122032900167-1).

### REFERENCES

- Schultz R., Skoumal R.J., Brudzinski M.R., Eaton D., Baptie B., Ellsworth W. Hydraulic fracturing-induced seismicity. *Reviews of Geophysics*, 2020, vol. 58, e2019RG000695. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019RG000695> (accessed 1 November 2022).
- Yu H., Harrington R.M., Kao H. Fluid-injection-induced earthquakes characterized by hybrid-frequency waveforms manifest the transition from aseismic to seismic slip. *Nat Commun*, 2021, vol. 12, 6862. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26961-x> (accessed 1 November 2022).
- Zang A., Zimmermann G., Hofmann H. How to reduce fluid-injection-induced seismicity. *Rock Mech Rock Eng*, 2019, vol. 52, pp. 475–493. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1467-4> (accessed 1 November 2022).
- ZheltoV Yu.P., Khristianovich S.A. O gidravlicheskom razryve neftenosnogo plasta [About hydraulic fracturing of an oil-bearing formation] *Izv. Academy of Sciences of the USSR. OTN*, 1955, no. 5, pp. 3–41.
- Geertsma J., De Klerk F. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures. *J. Petrol. Tech.*, 1969, no. 12, pp. 1571–1581.
- Sneddon I., Lowengrub M. *Crack problems in the classical theory of elasticity*. N.Y., John Wiley & Sons, 1969. 221 p.
- Nordgren R.P. Propagation of a vertical hydraulic fracture. *SPE J.*, 1972, vol. 12, no. 4, pp. 306–314.
- Sedov L.I. *Mehanika sploshnyh sred* [Continuum mechanics]. Moscow, Lan Publ., 2004. Vol. 2, 560 p.
- Akulich A.V., Zvyagin A.V. Numerical modeling of hydraulic fracture propagation. *Bulletin of Moscow University. Maths. Mechanics*, 2008, no. 1, pp. 43–49. In Rus.
- Desroches J., Detournay E., Lenoach B. The crack tip region in hydraulic fracturing. *Proc. Royal Soc. A*, 1994, vol. 447, pp. 39–48.
- Perkins T.K., Kern L.R. Widths of hydraulic fractures. *J. Petrol. Tech.*, 1961, no. 9, pp. 937–949.
- Garagash D., Detournay E., Adachi J. Multiscale tip asymptotics in hydraulic fracture with leak-off. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, vol. 669, pp. 260–297. DOI: 10.1017/S002211201000501X
- Gao Y., Detournay E. Hydraulic fracture induced by water injection in weak rock. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 927, A19. DOI: 10.1017/jfm.2021.770
- Yue Gao, Detournay E. A poroelastic model for laboratory hydraulic fracturing of weak permeable rock. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, vol. 143. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104090> (accessed 1 November 2022).
- Nguyen K., Mehrabian A., Santra A., Dung P. Tensile failure and fracture width of partially permeable wellbores with applications in lost circulation material design. *SPE J.*, 2022, vol. 27, pp. 465–487. DOI: <https://doi.org/10.2118/204585-PA>
- Liang Y., Cheng Y., Zou Q., Wang W., Ma Y., Li Q. Response characteristics of coal subjected to hydraulic fracturing: An evaluation based on real-time monitoring of borehole strain and acoustic emission. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2017, vol. 38, pp. 402–411.
- Stanchits S., Burghardt J., Surdi A. Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2015, vol. 48, pp. 2513–2527.
- Chen Y.; Nagaya Y.; Ishida T. Observations of fractures induced by hydraulic fracturing in anisotropic granite. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2015, vol. 48, pp. 1455–1461.

19. Stoeckert F., Molenda M., Brenne S., Alber M., Fracture propagation in sandstone and slate – Laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, vol. 7, Iss. 3, pp. 237–249. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.011> (accessed 1 November 2022).
20. Medlin W.L., Massé L. Laboratory experiments in fracture propagation. *SPE J.*, 1984, vol. 24, pp. 256–268. DOI: <https://doi.org/10.2118/10377-PA>
21. Nakagawa S., Nakashima S., Korneev V.A. Laboratory measurements of guided-wave propagation within a fluid-saturated fracture. *Geophysical Prospecting*. 2016. vol. 64, pp. 143–156. Available at: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12223> (accessed 1 November 2022).
22. Gunaydin D., Peirce A.P., Bungler A.P. Laboratory experiments contrasting growth of uniformly and non-uniformly spaced hydraulic fractures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, vol. 126, e2020JB020107. Available at: <https://doi.org/10.1029/2020JB020107> (accessed 1 November 2022).
23. Murdoch L.C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. P. 2. Propagation. *Geotechnique*, 1993, vol. 43, pp. 267–276.
24. Belyakov G.V., Tairova A.A., Iudochkin N.A., Torres T.M. Fracture formation in an inhomogeneous poroelastic medium. *Dynamic Processes in Geospheres*, 2021, vol. 13, pp. 60–63. In Rus. Available at: [https://doi.org/10.26006/22228535\\_2021\\_1\\_60](https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_60) (accessed 1 November 2022).
25. Torres T.M., Iudochkin N.A., Tairova A.A., Belyakov G.V. Fluid filtration in a medium with variable permeability. *Dynamic Processes in Geospheres*, 2022, vol. 14 (2), pp. 52–61. In Rus. Available at: [https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_52](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_52) (accessed 1 November 2022).
26. Saffman P.G., Taylor G.I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1958, vol. 245, Iss. 1242, pp. 312–329. Available at: <http://doi.org/10.1098/rspa.1958.0085> (accessed 1 November 2022).

Received: 17 November 2022.

Reviewed: 2 March 2023.

#### Information about the authors

*Aliya A. Tairova*, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geosphere Dynamics Russian Academy of Science.

*Georgiy V. Belyakov*, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geosphere Dynamics Russian Academy of Science.

*Nikita A. Iudochkin*, junior researcher, Institute of Geosphere Dynamics Russian Academy of Science.

УДК 538.9

## РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ВНУТРЕННИХ ПОКРЫТИЙ ОБОЛОЧЕК ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ АВАРИЙНО-УСТОЙЧИВЫХ ТВЭЛОВ

Рофида Хамад Халифад<sup>1</sup>,  
rofida@tpu.ru

Никитенков Николай Николаевич<sup>1</sup>,  
nikitenkov@tpu.ru

Кудияров Виктор Николаевич<sup>1</sup>,  
kudiyarov@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования заключается в необходимости создания аварийно-устойчивого топлива ядерных реакторов исходя из изучения причин и последствий аварий в Чернобыле и Фукусиме. Конкретная проблема, которой посвящена работа, – создание хромовых покрытий на внутренней стороне трубок тепловыделяющих элементов, что является одним из трендов в направлении создания аварийно-устойчивой активной зоны ядерного реактора.

**Основная цель исследования:** определить минимальную толщину хромового покрытия, необходимую для надежной защиты внутренней стороны оболочек (трубок) тепловыделяющих элементов от осколков деления ядерного топлива.

**Методы:** хорошо развитый (более 60-ти лет совершенствования), широко известный и признанный пакет компьютерных программ для моделирования физических процессов переноса излучений и ускоренных частиц в твердых телах с использованием статистики Монте-Карло. Определение минимальной толщины хромового покрытия для обеспечения защиты внутренней стороны оболочки тепловыделяющих элементов от основной группы высокоэнергичных осколков деления ядерного топлива проводилось на основе расчетов по программе TRIM (из пакета SRIM). В качестве бомбардирующих покрытие осколков деления из их широкого спектра выбраны <sup>97</sup>Tc, <sup>98</sup>Mo, <sup>102</sup>Ru, <sup>103</sup>Rh, <sup>106</sup>Pd, <sup>127</sup>I, <sup>133</sup>Cs как наиболее высокоэнергичные и в то же время обладающие разными химическими свойствами. Производились расчеты распределений глубин проникновения указанных осколков деления и повреждений (вакансий) в материале оболочки и в хромовых покрытиях.

**Результаты.** Было обнаружено, что минимальная толщина хрома, требующаяся для обеспечения адекватной защиты внутренней поверхности трубки тепловыделяющих элементов от основных осколков деления топлива <sup>235</sup>UO<sub>2</sub> составляет 9 мкм. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие этот результат.

### Ключевые слова:

аварийно-устойчивое топливо, хромовое покрытие, оболочки ТВЭЛ, поток нейтронов, реактивность, топливный цикл.

### Введение

Авария на АЭС Фукусима в 2011 г. высветила некоторые конструктивные недостатки традиционной ядерной топливной системы. Вследствие этого произошел глобальный сдвиг в исследованиях безопасности ядерного топлива в сторону создания аварийно-устойчивых тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). Концепция аварийно-устойчивого топлива (АУТ) подразумевает оптимизацию конструкции ТВЭЛ, которая, как ожидается, повысит безопасность ядерных реакторов. Фундаментальный принцип, лежащий в основе этой концепции, заключается в том, что активная зона реактора остается неповрежденной в течение более длительного времени без необходимости экстренного вмешательства оператора в аварийных случаях, например, при прекращении внешнего охлаждения. Одной из основных задач АУТ является разработка покрытий с выдающимися характеристиками, наносимых на конструкции из сплавов на основе циркония (Zr), из которых, в частности, изготавливаются трубки ТВЭЛ для загрузки таблеток диоксида урана (UO<sub>2</sub>) [1]. Концепции полной замены сплавов на основе циркония имеют большую неопределенность в плане изменения конструкции тепловыделяющих сборок и представляют собой относительно долго-

срочные и дорогостоящие решения. Использование защитных поверхностных покрытий на существующих сплавах на основе циркония позволит улучшить характеристики без существенных изменений существующей конструкции топливной системы «диоксид урана – цирконий» (UO<sub>2</sub>-Zr). Это более консервативный краткосрочный технический путь с благоприятными перспективами применения [1]. Металлический хром (Cr) рассматривается как основной материал для создания таких покрытий из-за его высокой температуры плавления, пластичности и коэффициентов термического расширения, близких к цирконию [1, 2]. К настоящему времени в ряде стран уже проведены исследования хромовых покрытий с применением различных методов осаждения, таких как: физическое осаждение из газовой фазы (Франция) [3, 4], вакуумно-дуговое плазменное осаждение (Россия) [5]; трехмерная лазерная технология [6], холодное и электродуговое ионное осаждение (Корея) [2, 7]. Эти исследования показали, что нанесение тонкой пленки металлического хрома значительно повышает коррозионную стойкость (основной параметр) сплавов на основе Zr. Образцы с покрытием продемонстрировали значительное улучшение в плане остаточной прочности и пластичности, а также уменьшение по-

глошения водорода по сравнению с оболочками из цирколия без покрытия в условиях легководяных реакторов (ЛВР). Исследования были сосредоточены в основном на нанесении хромовых покрытий на наружные поверхности оболочек труб и их работе в неаварийной ситуации. Однако существует реалистичный сценарий, когда пар из внешней среды попадает в трубку ТВЭЛ, например, в условиях аварии с потерей теплоносителя. Поступление пара на незащищенную внутреннюю поверхность оболочки может вызвать быстрое окисление и вторичное гидрирование, что в конечном итоге существенно усложняет сценарий аварии [1]. Поступление пара возможно через трещины после раздувания в аварийных условиях, возникающие в результате явления коррозионного растрескивания под напряжением (рис. 1). Последнее может быть связано с деформацией таблеток ядерного топлива в процессе их выгорания и наличием накопленных осколков деления (ОД) на границе раз-

дела таблетка– оболочка. При аварии с ограничением теплоносителя, даже при проектной аварии с потерей теплоносителя, вздутие и разрыв происходят уже при температурах до 700 °С [2]. Проблема деградации внутренней стороны ТВЭЛ была выделена как источник беспокойства при использовании защитных покрытий [8, 9]. Для обеспечения защиты и ограничения повреждений на внутренней стороне оболочки ТВЭЛ было предложено наносить внутреннее тонкопленочное покрытие (ВТПП) [10–13]. Предварительные исследования поведения подложек из цирколия-4 с ВТПП в двух различных условиях окисления показали многообещающие результаты с признаками значительного дополнительного времени восстановления перед разрушением при закалке. Возникновение катастрофического окисления при 1200 °С было отсрочено, а увеличение массы образцов с двусторонним покрытием уменьшилось в 20 раз по сравнению с эталонными образцами без покрытия [10].

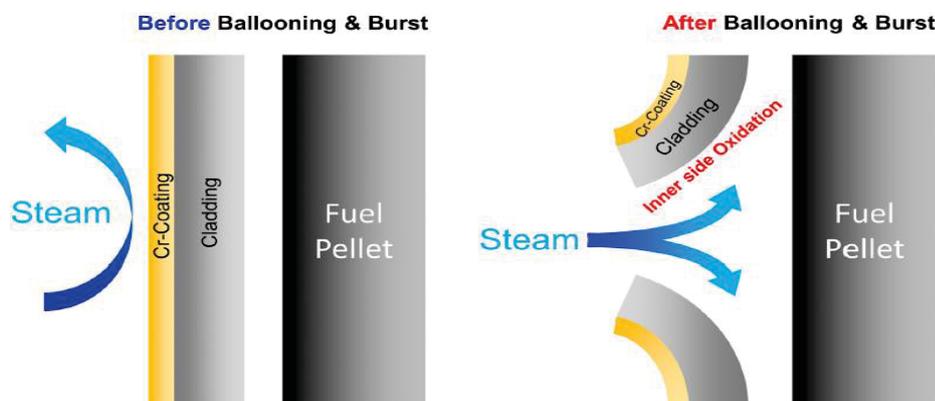


Рис. 1. Схема окисления внутренней поверхности после формирования воздушного облака и разрыва [8] (Steam – пар, ballooning – вздутие, burst – разрыв, cladding – оболочка, fuel pellet – таблетка топлива)

Fig. 1. Schematic of inner-side oxidation following ballooning and burst [8]

Кроме того, более толстые ВТПП вызывают значительное повышение температуры разрыва, что указывает на то, что такие покрытия могут оказывать упрочняющее действие при высоких температурах [13].

Впервые концепция ВТПП была предложена ещё в 1970-х гг. как решение проблемы коррозионного растрескивания (КР) в канадских тяжеловодных энергетических реакторах (ТВЭР) путем нанесения графитовой плёнки. Это возможно для оболочек таких реакторов благодаря относительно небольшой длине труб (около 0,5 м), что значительно упрощает нанесение покрытий на внутреннюю поверхность труб по сравнению с реакторами на легкой воде [14]. Поэтому это решение не привело к его широкому внедрению. Однако недавние достижения в разработке технологий тонких пленок вынесли эту тему на поверхность в качестве дополнительного решения в рамках разработок АУТ [10–13]. Помимо приведенных выше частично изученных характеристик хромовых покрытий, необходимо исследовать (с целью оптимизации) ряд других параметров, например, структуру, роль дефектов, оптимальную толщину покрытия и чувствительность работы реактора к введению таких покрытий.

Ожидается, что материалы покрытий, предлагаемые для АУТ, будут влиять на работу реактора из-за их возможного воздействия на баланс нейтронов в системе, изменений в энергетических спектрах нейтронов и соответствующего воздействия на безопасность реакторов. Материалы покрытий могут снижать реактивность системы и влиять на расход топлива, что ведет к нежелательным экономическим последствиям. Кроме того, могут быть затронуты параметры безопасности реактора.

Одной из основных задач, которые нужно решить для внедрения ВТПП в качестве защитного покрытия, является выбор материала и необходимой толщины покрытия для осуществления адекватной защиты оболочки ядерного топлива (как правило, это трубки из сплава Э110) от ОД. Одним из наиболее перспективных материалов на сегодняшний день является хром. Поэтому в данном исследовании мы рассчитываем необходимую толщину хромового ВТПП. Для этого сначала определяется минимальная толщина пленки Cr, которая может обеспечить достаточную защиту внутренней поверхности оболочек от воздействия ОД при нормальной (безаварийной) работе реактора.

Подход, используемый для определения минимальной толщины, основан на расчетах распределений максимальной глубины имплантации и повреждений в покрытии. На основании этих расчетов определяется минимальная толщина ВТПП.

#### Методология расчетов и входные параметры

Прежде чем кратко описать методологию и процедуру расчетов, приведем экспериментальные факты, которые имелись в виду при её разработке.

В отличие от внешней поверхности оболочек (трубок) ТВЭЛ, окисление и деградация облученной внутренней поверхности широко не изучались, хотя вклад ОД в их повреждение известен давно. При работе реактора мощность дозы ОД примерно в 12,5 раз превышает мощность нейтронного и гамма-излучения [15]. Такие явления, как снижение пластичности, охрупчивание и в конечном счете растрескивание материала трубок ТВЭЛ тесно связаны с внедрением ОД во внутреннюю поверхность трубок [16, 17].

Согласно экспериментальным измерениям, ОД имеют широкий диапазон энергий и различные величины сечений выхода [18]. Чем больше энергия частицы, тем длиннее её пробег внутри материала. Мы использовали максимальные энергии, которые обычно соответствуют минимальной величине выхода изотопа, выбранного ОД, что способствует более точному выбору минимальной толщины покрытия. То есть, чтобы определить минимальную толщину покрытия для защиты внутренней поверхности, были смоделированы величины пробегов ионов и 3D-распределения повреждений (смещенных атомов и вакансий) для группы ОД в составе следующих атомов. Металлы технеций (Tc), рутений (Ru), молибден (Mo), родий (Rh) и палладий (Pd), а также атомы летучих продуктов: йод (I) и цезий (Cs). В качестве подложки покрытия использовался сплав Э110 (Zr – 99 %, V – 1 %). На основе рассчитанных величин пробегов ОД и распределений повреждения в подложке (Э110) и покрытия (Cr) определена минимальная толщина покрытия из хрома.

Выбранные ОД характеризуются относительно высоким выходом в процессе деления ядерного топлива. Следы этих продуктов были экспериментально обнаружены внутри оболочки отработавших ТВЭЛ многими исследователями, и была установлена тесная связь между их присутствием и многими явлениями деградации внутренней поверхности оболочки (внутренняя коррозия, охрупчивание, снижение пластичности, коррозионное растрескивание). Эксперименты показали, что частицы фазы благородных металлов из числа выбранных нами ОД существуют в виде поликристаллических металлических агломератов [19] в приповерхностной области внутренней стороны оболочки ТВЭЛ. Это указывает на то, что эти продукты играют ключевую роль в иницировании трещин [20]. После появления трещин коррозионно-летучие вещества (такие как йод и цезий) проникают через трещины и вызывают дальнейшую коррозию ТВЭЛ.

Расчеты проведены с использованием хорошо зарекомендовавшего себя программного пакета SRIM

(Stopping and Range of Ions in Matter). Начало разработки датируется 70-ми гг. прошлого века. SRIM моделирует процессы (computer simulation), изученные экспериментально и теоретически. То есть в основе SRIM лежат теории переноса частиц и излучений в веществе (теории атомных столкновений в твердом теле, прохождения частиц через вещество, ионного рассеяния и распыления и др.).

Для настоящих расчетов использовалась программа TRIM (Transport of Ions in Matter), являющаяся одним из модулей пакета SRIM. Работа программы основана на методе аппроксимации бинарных столкновений (АБС) в твердом теле. АБС, в свою очередь, представляет собой одну из реализаций метода Монте-Карло, адаптированного для задач, связанных с развитием каскадов атомных столкновений в твердом теле под воздействием пучков высокоэнергетических ионов. SRIM широко используется при исследованиях радиационных нарушений в материалах разного состава ускоренными ионами с разными массами и энергиями (например, [21]).

Программа TRIM способна работать с материалами сложного состава и предлагает различные варианты оценки их повреждений. В режиме «быстрого расчета повреждений», используемом в этом исследовании, рассчитанные повреждения являются результатом их быстрой статистической оценки, основанной на критериях Кинчина–Пиза (К-П) [22]. Используемые при этом входные параметры даны в табл. 1.

Таблица 1. Входные параметры для расчетов в TRIM

Table 1. Input parameters for calculations in TRIM

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Вес, аеи Weight (amu)	Доля в образце, % Fraction, %	Энергия смещения, Е, эВ Displacement energy, E, eV	Энергия связи в решетке, эВ Lattice binding energy, eV	Энергия связи с поверхностью, эВ Surface binding energy, eV
Nb	41	92,90	1	60	3	7,59
Cr	24	51,99	100	40	3	4,12
Zr	40	91,22	99	40	3	6,33

Примечание/Note: Смысл параметров, используемых TRIM, не всегда соответствует академическому. В данном случае: энергия смещения – энергия, необходимая атому отдачи для преодоления связи с решеткой и перемещения более чем на один атомный интервал от исходного положения (Displacement energy is the energy required for a recoil atom to overcome lattice forces and move more than one atomic interval from its original position); энергия связи в решетке – энергия, которую теряет атом отдачи, когда он покидает свое место в решетке (Lattice binding energy is the energy that each target atom loses when it leaves its lattice site and bounces into the targets); энергия связи с поверхностью – это энергия, которую должны преодолеть атомы мишени, чтобы покинуть поверхность мишени (surface binding energy is the energy that the target atoms must overcome to leave the target surface).

TRIM при этом «следует» только вдоль траектории первичного (внедряемого) атома (иона) в твердом теле, смещающего атомы материала. Этот подход ис-

пользуют, когда требуется мало внимания к деталям повреждения мишени или распылению поверхности. Понятно, что на максимальную глубину проникают именно первичные (налетающие) ионы, а не выбитые ими атомы мишени.

В методе К-П атом, выбитый со своего места в твердом теле, получает энергию  $E_v$ , связанную с энергией отдачи  $T$  с учетом электронных потерь [22]:

$$E_v = \frac{T}{1 + K_d g(\varepsilon_d)}, \quad (1)$$

где электронные потери  $K_d$  вычисляются как:

$$K_d = -0,1334 M_2^{-1/2} Z_2^3,$$

где  $Z_2$  и  $M_2$  – атомные номер и масса атомов мишени, и:

$$g(E_d) = E_d + 0,40244 \varepsilon_d^{3/4} + 3,4008 \varepsilon_d^{1/6},$$

где  $\varepsilon_d$  – приведенная энергия, определяемая как

$$\varepsilon_d = 0,01014 Z_2^{7/3} T.$$

Таким образом, если  $E_v$  в (1) известна, то число смещений  $\nu$ , в соответствии с моделью Кинчина–Пиза, рассчитывается как

$$\nu = 1, \text{ if } E_d < E_v < 2,5 E_d,$$

$$\nu = \frac{0,8 E_v}{2,5 E_d}, \text{ if } E_v > 2,5 E_d.$$

Для настройки программы вначале были выбраны различные начальные количества падающих ионов: 1000, 4000, 10000, 20000, 30000. Моделирование показало, что диапазон пробегов этих ионов и повреждения материалов не изменяются после числа ионов равного 4000 (т. е. рассчитанные величины пробегов и глубин повреждений одинаковы для числа падающих ионов 4000 и более). Таким образом, в приведенных расчетах количество падающих ионов для моделируемой группы ПР выбрано равным 4000 (то есть относительная погрешность расчетов равна 0,02).

### Результаты и обсуждение

Графические картины результатов, которые выдает программа, очень похожи для всех ОД. Несущественные, в нашем случае, различия наблюдаются в 2D и 3D изображениях пространственных распределений пробегов и повреждений. Поэтому ниже в качестве примера графических данных они приведены только для одного элемента – Tc с энергией 120 МэВ (рис. 2–5). На этих рисунках показаны результаты расчетов распределений пробегов Tc в сплаве Э110

(рис. 2), а также картины повреждений в сплаве Э110 (рис. 3) и в покрытии хрома на сплаве Э110 (рис. 4, 5). В табл. 2, 3 приведены результаты всех расчетов для всех выбранных ОД.

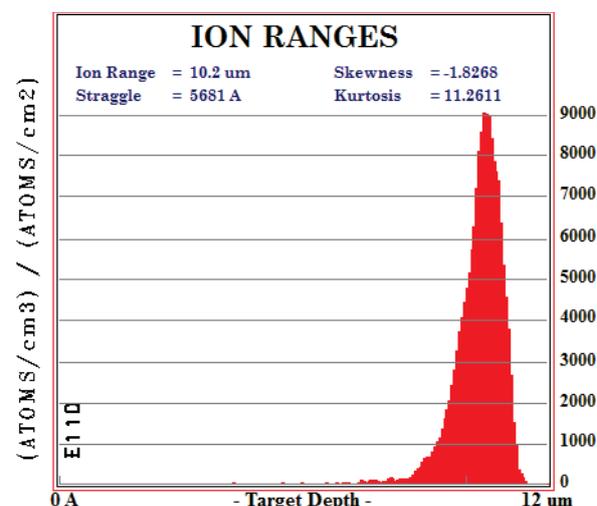


Рис. 2. Распределение пробегов Tc с энергией 120 МэВ в сплаве Э110

Fig. 2. Ion ranges for Tc ions with 120 MeV energy in E110 alloy

Таблица 2. Пробег и ионов в сплаве Э110

Table 2. Ion ranges in E110 alloy

Ионы/Ions	<sup>99</sup> Tc	<sup>98</sup> Ru	<sup>102</sup> Mo	<sup>103</sup> Rh	<sup>107</sup> Pd	<sup>127</sup> I	<sup>133</sup> Cs	
Энергия, МэВ Energy, MeV	120						90	95
Глубина проникновения, мкм Ion range, μm	10,2	10,3	10,4	10,2	10,2	8,7	9,2	
Разброс Straggle, μm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	

Из рис. 2 и табл. 2 видно, что в случае технеция, повреждения в сплаве Э110 (оболочка ТВЭЛ) распространяются на глубину более 10 мкм, при этом образуется 27162 вакансии на 1 ион технеция. Из табл. 2 видно также, что для всех исследованных ОД глубины, на которые они могут проникать внутрь оболочек ТВЭЛ (сплав Э110), находятся в диапазоне ~8–10 мкм.

Этот результат хорошо согласуется с выводами Hirabayashi и др. [23] при экспериментальном исследовании распределения ОД в оболочке из циркалоя-4 отработавшего топлива методом ступенчатого травления. Согласно этим результатам, более 98 % ОД были обнаружены на глубине ~10 мкм от внутренней поверхности оболочек ТВЭЛ.

Таблица 3. Повреждения сплава Э110 и хромового покрытия на сплаве Э110

Table 3. Damage caused in E110 alloy and Cr coated E110

Ионы/Ions	<sup>99</sup> Tc	<sup>98</sup> Ru	<sup>102</sup> Mo	<sup>103</sup> Rh	<sup>107</sup> Pd	<sup>127</sup> I	<sup>133</sup> Cs
Энергия, МэВ/Energy, MeV	120						90
Повреждения E110 вакансий/ион Damage (E110), vacancies/ion	27160	29060	26830	29890	31340	40410	43740
Повреждения (Cr на Э110), вакансий/ион Damage (Cr coated E110), vacancies/ion	22720	24300	22510	24970	26060	33600	36330
Толщина Cr, мкм/Cr thickness, μm	9	9	9	9	9	8	8

Кроме того, было показано, что содержание продуктов деления в оболочках имеет градиентное распределение по глубине. Это может быть напрямую связано с градиентом выхода и энергией отдачи ОД при делении ядер [18].

Сводка результатов расчетов распределения повреждений, вызванных основной группой ОД и выбранной толщиной хрома, приведена в табл. 3. Видно, что повреждения, вызванные в покрытиях хрома, меньше, чем вызванные теми же ионами в сплаве Э110, что указывает на большую способность хромовых покрытий выдерживать облучение ОД и обеспечивать защиту внутренней поверхности ТВЭЛ.

Представленные в табл. 3 результаты коррелируют также с наблюдениями Ciszak и др. [23], полученные при исследовании методом Рамановской спек-

троскопии внутреннего приповерхностного слоя ТВЭЛ из циркалоя-4 после его использования в качестве оболочки топлива глубокого выгорания. Наблюдалось градиентное распределение имплантированных ОД до глубины от 8 до 10 мкм.

Было также смоделировано максимальное повреждение в сплаве Э110, соответствующее максимальной ожидаемой энергии отдачи для ОД. Исходя из диапазонов имплантации и повреждения выбирается минимальная толщина тонкой пленки Cr, которая могла бы обеспечить достаточную защиту внутренней поверхности оболочки ТВЭЛ. На рис. 3 показаны распределения повреждений, вызванных Тс 120 МэВ в сплаве E110, а на рис. 4 – распределения повреждений в пленке циркония, «нанесенной» на этот сплав.

**Total Displacements = 27162 / Ion**  
**Total Vacancies = 27162 / Ion**  
**Replacement Collisions = 0 / Ion**

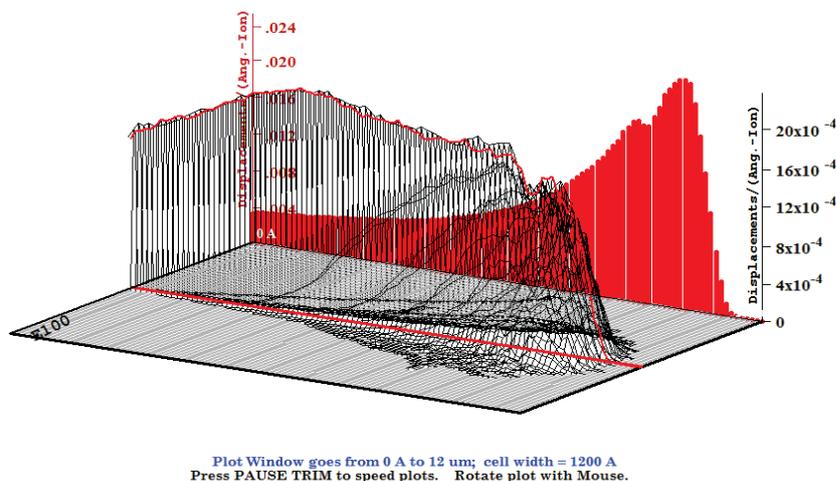


Рис. 3. Распределения повреждений, вызванных 120 МэВ Тс в сплаве Э110  
 Fig. 3. Damage caused by 120 MeV Tc in E110 alloy

**Total Displacements = 22725 / Ion**  
**Total Vacancies = 22725 / Ion**  
**Replacement Collisions = 0 / Ion**

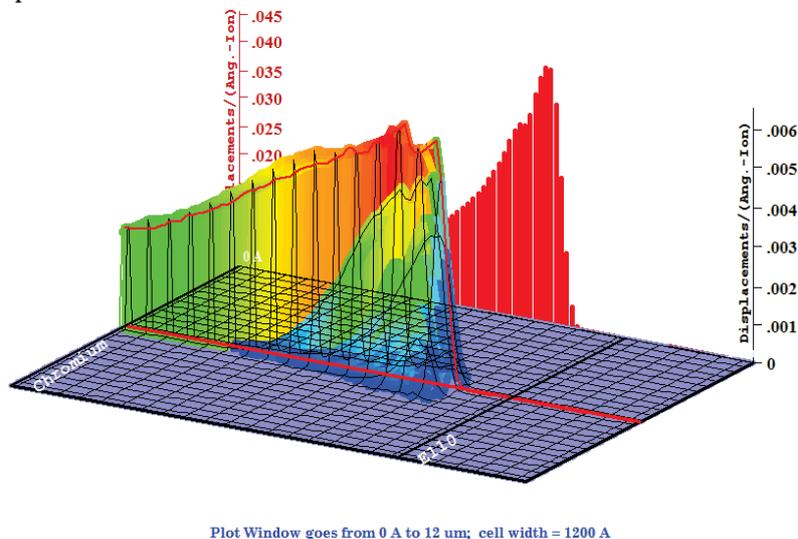
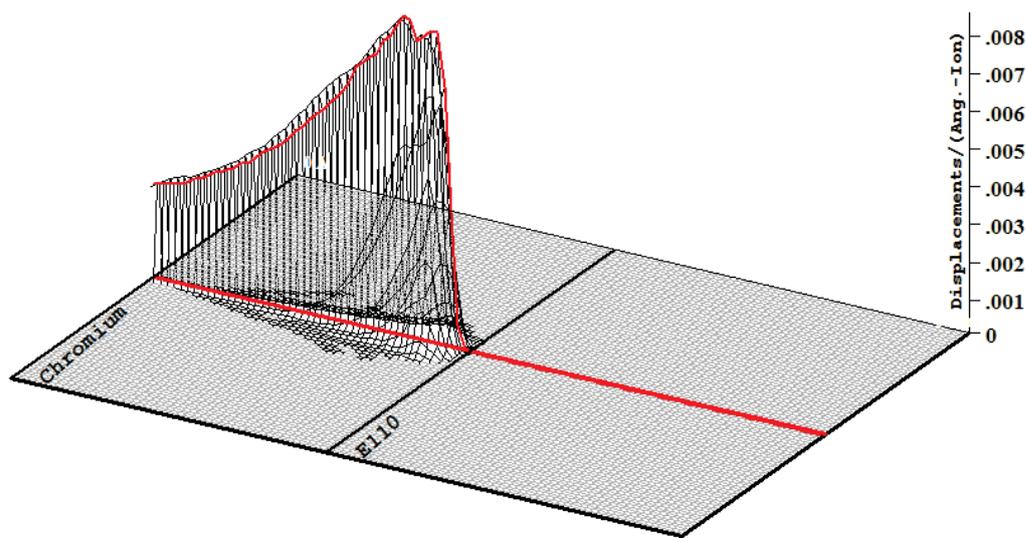


Рис. 4. Распределения повреждений, вызванных атомами Тс 120 МэВ, в покрытии хрома толщиной 9 мкм на сплаве Э110  
 Fig. 4. Damage caused by 120 MeV Tc in the Cr-coated with 9 μm on E110 alloy

На рис. 5 показаны результаты «использования» Cr-покрытия толщиной 8 мкм (для сравнения расположения максимальной глубины повреждения относительно границы «пленка/подложка» при использовании толщины 9 мкм, показанной на рис. 4). Видно, что в этом случае повреждения, с максимумом распределения при

7,3 мкм, распространяется на область границы раздела «покрытие (Cr)/материал трубки (Э110)», что, в свою очередь, может повлиять на адгезию покрытия, поскольку вблизи областей раздела будут существовать дефекты и вакансии. Это может привести к быстрому отшелушиванию покрытия при эксплуатации.

**Total Displacements = 22725 / Ion**  
**Total Vacancies = 22725 / Ion**  
**Replacement Collisions = 0 / Ion**



Plot Window goes from 0 A to 17 um; cell width = 1700 A

Рис. 5. Распределение повреждений в системе «покрытие Cr толщиной 8 мкм на сплаве Э110» ионами Tc с энергией 120 МэВ

Fig. 5. Distribution of damage in the system «Cr coating 8 μm thick on E110 alloy» by Tc ions with 120 MeV energy

Таким образом, основываясь на выходных данных моделирования, можно сделать вывод, что для обеспечения адекватной защиты внутренней поверхности оболочек ТВЭЛ на основе циркония потребуются хромовое покрытие толщиной ~9 мкм, принимая во внимание основные факторы, способствующие деградации на внутренней стороне оболочки ядерного топлива.

#### Заключение

В этом исследовании изучены некоторые аспекты разработки тонкопленочных покрытий на внутреннюю поверхность трубок ТВЭЛ ядерных реакторов с целью защиты от осколков деления ядерного топлива. Основным используемым в исследовании метод –

компьютерное моделирование физических процессов с использованием признанного мировым научным сообществом пакета компьютерных программ.

Минимальная толщина покрытия Cr для защиты внутренней поверхности трубок ТВЭЛ определена, как равная 9 мкм. Данная толщина хромовой пленки обеспечит достаточную защиту внутренней поверхности ТВЭЛ от проникновения высокоэнергетических осколков деления ядерного топлива. Результаты расчётов подтверждены опубликованными экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10116)

#### REFERENCES/СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen H., Wang X., Zhang R. Application and development progress of Cr-based surface coatings in nuclear fuel element: I. Selection, preparation, and characteristics of coating materials. *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 808. DOI: 10.3390/coatings10090808.
2. Tang C., Stueber M., Seifert H., Steinbrueck M. Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings. *Corrosion Reviews*, 2017, vol. 35, pp. 141–165. DOI: 10.1515/corrrev-2017-0010.
3. Idarraga-Trujillo I., Flem M. L., Brachet J., Saux M.L., Hamon D., Muller S., Vandenberghe V., Tupin M., Papin E., Monsifrot E., Billard A., Schuste F. Assessment at CEA of coated nuclear fuel cladding for LWRs with increased margins in LOCA and beyond LOCA conditions. *Proceeding of LWR Fuel Performance Meeting/Top Fuel*. Charlotte, USA, September 15–19, 2013. pp. 860–867.
4. Brachet J.C., Le Saux M., Le Flem M., Urvoy S., Rouesne E., Guilbert T., Cobac C., Lahogue F., Rousselot J., Tupin M., Billard P., Hossepied C., Schuster F., Lomello F., Billard A., Velisa G., Monsifrot E., Bischoff J., Ambard A. On-going studies at CEA on

- chromium coated zirconium based nuclear fuel claddings for enhanced accident tolerant LWRs fuel. *Proceedings of 2015 LWR Fuel Performance/Top Fuel*. Zurich, Switzerland, September 13–19, 2015. pp. 31–38.
5. Ivanova S.V., Glagovsky E.M., Nikonorov K.Y., Belugin I.I., Khazov I.A. Methods to increase corrosion stability and wear resistance. *Proceeding of LWR Fuel Performance Meeting/Top Fuel*. Charlotte, USA, September 15–19, 2013. pp. 334–350.
  6. Kim H.G., Kim I., Jung Y., Park D., Park J., Koo Y. Adhesion property and high-temperature oxidation behavior of Cr-coated Zircaloy-4 cladding tube prepared by 3D laser coating. *Journal of Nuclear Materials*, 2016, vol. 465, pp. 531–539.
  7. Park J.H., Kim H., Park J., Jung Y., Park D., Koo Y. High temperature steam-oxidation behavior of arc ion plated Cr coatings for accident tolerant fuel claddings. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 280, pp. 256–259.
  8. NEA. *State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels*, 2018, NEA-7317. Paris, OECD Publishing. 2018. 372 p. Available at: [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_15020/state-of-the-art-report-on-light-water-reactor-accident-tolerant-fuels?details=true](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_15020/state-of-the-art-report-on-light-water-reactor-accident-tolerant-fuels?details=true) (accessed 15 March 2023).
  9. Michau A., Maury F., Schuster F., Lomello F., Boichot R., Pons M., Brachet J., Monsifrot E. Inner-side coatings for advanced fuel claddings processed by DLI-MOCVD. *Proceedings of the Water Reactor Fuel Performance Meeting*. Jeju Island, Korea, 2017. pp. 1–7.
  10. Michau A., Maskrot H., Gazal Y., Maury F., Boichot R., Pons M., Brachet J., Monsifrot E., Schuster F. Inner surface protection of nuclear fuel cladding, towards a full-length treatment by DLI-MOCVD, an optimized coating process. *Proceedings of the Top Fuel*. Prague, Czech Republic, 2018. pp. 1–11.
  11. Michau A., Gazal Y., Addou F., Maury F., Duguet T., Boichot R., Pons M., Monsifrot E., Maskrot H., Schuster F. Scale up of a DLI-MOCVD process for the internal treatment of a batch of 16 nuclear fuel cladding segments with a CrxCy protective coating. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 375, pp. 894–902. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.06.101.
  12. Brachet J.C., Urvoy S., Rouesne E., Nony G., Dumervil M., Saux M.L., Ott F., Michau A., Schuster F., Maury F. DLI-MOCVD CrxCy coating to prevent Zr-based cladding from inner oxidation and secondary hydriding upon LOCA conditions. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, vol. 550, pp. 152953. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2021.152953.
  13. Edsinger K., Murty K.L. LWR pellet-cladding interactions: materials solutions to SCC. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, vol. 53, pp. 9–13. DOI: 10.1007/s11837-001-0079-7.
  14. Lach T.G., Edwards D.J., Buck E.C., McNamara B.K., Schwantes J.M., Clark R.A. Fission recoil-induced microstructural evolution of the fuel-cladding interface [FCI] in high burnup BWR fuel. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 521, pp. 120–125. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.04.044.
  15. Schuster I., Lemaignan C. Embrittlement, induced by fission recoils, of the inner surface of PWR fuel cladding – a simulation using heavy ions. *Journal of Nuclear Materials*, 1988, vol. 151, pp. 108–111. DOI: 10.1016/0022-3115(88)90062-1.
  16. Nakatsuka M., Nomata T., Umehara H. Development of the ultra-micro-hardness technique for post irradiation examination of fuel cladding tubes. *Journal of Nuclear Science Technology*, 1998, vol. 35, pp. 344–352. DOI: 10.1080/18811248.1998.9733870.
  17. Rymzhanov R.A., Saifulin M.M., Akilbekov A. Numerical estimation of fission fragments flux on surface of fuel cladding. *Proceedings of the 12th International Conference Interaction of Radiation with Solids*. Minsk, Belarus, 2017. pp. 108–110.
  18. Clark R.A., Conroy M.A., Lach T.G., Buck E.C., Pellegrini K.L., McNamara B.K., Schwantes J.M. Distribution of metallic fission product particles in the cladding liner of spent nuclear fuel. *NPJ Material Degradation*, 2020, vol. 4, pp. 1–9.
  19. Sidky P. Iodine stress corrosion cracking of Zircaloy reactor cladding: iodine chemistry (a review). *Journal of Nuclear Materials*, 1998, vol. 256, pp. 1–17. DOI: 10.1016/s0022-3115(98)00444-0.
  20. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Ovchinnikov M.A., Timofeyev M.A., Vysotina E.A. Surface patterns formation by high fluence ions irradiation of PAN based carbon fibers. *Vacuum*, 2021, V.188, Art. 110177. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110177> (accessed 15 March 2023).
  21. Ziegler J.F., Biersack J.P., Ziegler M.D. SRIM – the Stopping and Range of Ions in Matter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, vol. 268, Iss. 11–12, pp. 1818–1823. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091> (accessed 15 March 2023).
  22. Hirabayashi T., Sato T., Sagawa C., Masaki N., Saeki M., Adachi T. Distributions of radionuclides on and in spent nuclear fuel claddings of pressurized water reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 1990, vol. 174, pp. 45–52. DOI: 10.1016/0022-3115(90)90419-n.
  23. Ciszak C., Mermoux M., Miro S., Gutierrez G., Leprêtre F., Popa I., Hanifi K., Zacharie-Aubrun I., Fayette L., Chevalier S. Micro-Raman analysis of the fuel-cladding interface in a high burnup PWR fuel rod. *Journal of Nuclear Materials*, 2017, vol. 495, pp. 392–404. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.08.038.

Поступила: 27.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 11.04.2023 г.

#### Информация об авторах

**Хамад Халифад Р.**, аспирант отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Никитенков Н.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кудияров В.Н.**, кандидат технических наук, доцент отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 538.9

## CALCULATION OF NUCLEAR FUEL CLADDING INTERNAL COATING THICKNESS FOR EMERGENCY RESISTANT NUCLEAR FUEL ELEMENT

Rofida Hamad Khalifa Hamad<sup>1</sup>,  
rofida@tpu.ru

Nikolai N. Nikitenkov<sup>1</sup>,  
nikitenkov@tpu.ru

Viktor N. Kudiyarov<sup>1</sup>,  
kudiyarov@tpu.ru

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

**The relevance** of the study lies in the need to create an emergency resistant fuel for nuclear reactors, based on the study of the consequences of accidents in Chernobyl and Fukushima. The specific problem to which the work is devoted is the creation of thin-film chromium coatings on the inside of nuclear fuel element tubes, which is one of the directions for creating an emergency resistant core of a nuclear reactor.

**The main aim** of the research is to determine the minimum thickness of the chromium coating necessary for adequate protection of the inner side of the fuel rod cladding from nuclear fuel fission fragments.

**Methods:** a well-developed (more than 60 years of improvement) and widely known and recognized software package to simulate the physical processes of radiation and accelerated particle transport in solids using Monte Carlo statistics. The determination of the minimum thickness of the chromium coating to ensure protection of the inner side of the fuel element cladding from the main group of high-energy fission fragments of nuclear fuel was carried out on the basis of calculations using the TRIM program (from the SRIM package). <sup>97</sup>Tc, <sup>98</sup>Mo, <sup>102</sup>Ru, <sup>103</sup>Rh, <sup>106</sup>Pd, <sup>127</sup>I, <sup>133</sup>Cs were selected as bombarding the coating from their wide range of nuclear fuel fission fragments, as the most high-energy and at the same time, having different chemical properties.

**Results.** It was found that the minimum thickness of chromium required to provide adequate protection of the inner surface of the fuel tube from the main fission fragments of the U<sub>235</sub>O<sub>2</sub> fuel is 9 μm. Experimental data confirming this result are presented.

**Key words:**

emergency resistant fuel, chrome coating, internal coating, nuclear fuel, neutron flux, reactivity, fuel cycle.

*The research was supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-79-10116).*

**Information about the authors**

**Rofida Hamad Khalifa Hamad**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Nikolai N. Nikitenkov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Viktor N. Kudiyarov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Received: 27 March 2023.*

*Reviewed: 11 April 2023.*

УДК 622.276.63

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖИДКОСТИ ГЛУШЕНИЯ НА СНИЖЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАРБОНАТНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОСВОЕНИИ СКВАЖИН

Сентемов Андрей Алексеевич<sup>1</sup>,  
sentemov.a.a@yandex.ru

Дорфман Михаил Борисович<sup>1</sup>,  
m.dorfman@narfu.ru

<sup>1</sup> Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17.

**Актуальность.** Проведение ремонтных операций в добывающих и нагнетательных скважинах при неправильно подобранных компонентах жидкостей глушения может привести к существенному снижению проницаемости призабойной зоны пласта. Сохранение фильтрационно-емкостных свойств пород вблизи скважин при их глушении для проведения текущих ремонтов и последующего освоения является одной из актуальных проблем при эксплуатации фонда скважин в настоящее время.

**Цель:** изучить влияние различных добавок в составе жидкостей глушения на фильтрационно-емкостные свойства пласта и выявить подходы по предотвращению осложнений при ремонтах скважин.

**Методы:** эмпирические и аналитические методы. В лабораторных условиях определялся химический состав, оптическая плотность и коэффициент светопропускания жидкостей глушения и пластовой воды. Моделирование фильтрации пластовых флюидов выполнялось на установке исследования керна.

**Результаты.** Основной причиной снижения проницаемости призабойной зоны при глушении скважин в Тимано-Печорской нефтегазовой провинции является высокое содержание ионов железа в пластовых водах. Следует отметить, что воды фаменского горизонта содержат 60–70 мг/л железа. Для решения проблемы ухудшения фильтрационных характеристик призабойной зоны необходимо значительно снизить содержание железа в жидкости глушения или предотвратить его выпадение. Анализ результатов изменения оптической плотности растворов позволяет говорить об эффективности применения оксиэтилдифосфоновой кислоты и композиции АКСИС-КС для осветления и стабилизации жидкости глушения с содержанием гидратируемых ионов железа до 70 мг/л. На основании проведенных фильтрационных экспериментов для снижения негативного влияния растворенного железа на проницаемость пласта можно рекомендовать к использованию стабилизатор железа оксиэтилдифосфоновой кислоты в концентрации 2,0 % (при содержании ионов железа до 70 мг/л) и гидрофобизатор комплексного действия Нефтенол-К в концентрации 1 %.

### Ключевые слова:

Жидкость глушения, проницаемость, призабойная зона пласта, карбонатный коллектор, соединения железа.

### Введение

Сохранение фильтрационно-емкостных свойств пород призабойной зоны пласта (ПЗП) нефтяных скважин при их глушении перед проведением текущих ремонтов и последующим освоением является одной из актуальных проблем при эксплуатации фонда скважин в настоящее время.

В процессе глушения скважин при воздействии технологических жидкостей на продуктивный пласт происходит внутрискважинная коагуляция коллектора по причине ряда микропроцессов. На ухудшение проницаемости влияет набухание глинистых пород. Вследствие действия капиллярных сил при вытеснении несмешивающихся жидкостей в поровом пространстве возникает эффект «водной блокады». При взаимодействии технологических и пластовых жидкостей могут образовываться высоковязкие водонефтяные эмульсии и нерастворимые осадки. Твёрдые частицы, проникающие в пласт вместе с технологическими жидкостями, могут закупоривать поры и каналы. Жидкость глушения может образовывать плёнку на поверхности зёрен породы коллектора и уменьшать поперечное сечение каналов [1, 2]. Снижение проницаемости при глушении скважин обусловлено вышеуказанными процессами. Ухудшение фильтрационно-емкостных свойств ПЗП отрицательно влияет

на добычные способности скважин. В большей степени это проявляется на месторождениях нефти с низкопроницаемыми гидрофильными коллекторами [3, 4]. Ухудшение работы скважин после освоения в большей степени присуще месторождениям в терригенных коллекторах [5, 6]. Однако данное явление имеет существенное проявление и на месторождениях с карбонатными коллекторами, разрабатываемых в центральной части Тимано-Печорской нефтегазовой провинции [7].

Одним из определяющих факторов, влияющих на эффективность глушения и последующего освоения скважин, является присутствие ионов железа в жидкости глушения, которые образуются при контакте с металлическими емкостями и трубопроводами [8–10]. Основным источником поступления ионов железа является пластовая вода, которая используется для приготовления жидкостей глушения [11–13].

Железо обычно содержится в составе химических соединений. В составе растворов железо имеет растворённую, взвешенную или коллоидную формы в зависимости от компонентного состава раствора. Соотношение форм определяется совокупностью факторов: уровнем кислотности среды; наличием других химических элементов и реакциями, протекающими между ними; активностью железобактерий, активизи-

рующих восстановительные реакции с железом [14, 15].

В процессе химических реакций железо как химический элемент может менять свою валентность. Элементарное железо ( $Fe_0$ ) нерастворимо в воде. При взаимодействии с влагой железо окисляется до трёхвалентного соединения, образуя окись железа  $Fe_2O_3$ . Двухвалентное соединение железа (закись железа  $FeO$ ) может находиться в растворённом виде. В составе гидроксидов железа также может быть двух- и трёхвалентным ( $Fe(OH)_2$  и  $Fe(OH)_3$ ) [16, 17].

Железо в составе органических соединений имеет коллоидную структуру или образует растворимые соединения. Органические соединения представлены бактериальным железом (накопленным бактериями в процессе их жизнедеятельности), коллоидным железом (нерастворимыми частицами размером менее микрона) и железом в составе сложных растворимых комплексов – хелатов [18, 19].

Характер взаимодействия форм железа с водой различный. По внешним признакам можно определить наличие растворённого железа в воде и его форму. Двухвалентное железо проявляется только после отстаивания, прозрачный цвет воды меняется на красно-бурый цвет. Трёхвалентное железо, растворённое в воде, вначале придаёт ей желтовато-бурый цвет, а после образуется красно-бурый осадок. Коллоидное железо в воде не образует осадка, однако придаёт воде жёлто-бурый цвет. Бактериальное железо образует желеобразную плёнку на поверхности воды в емкости. Отличительные признаки форм железа, растворённого в воде, приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Отличительные признаки различных форм железа в воде

**Table 1.** Distinctive features of various forms of iron in water

Формы железа Forms of Iron	Внешний признак до отстаивания Outward before settling	Осадок после отстаивания Sediment after settling
Двухвалентное Bivalent	Вода прозрачная Clear water	Красно-бурый осадок Red-brown sediment
Трёхвалентное Trivalent	Желтый оттенок Yellow tint	
Коллоидное Colloidal	Желто-бурая Yellow-brown	Не образует осадка Without sediment
Бактериальное Bacterial	Опалесцирующая пленка Opalescent film	Не фильтруется No filtering
Растворенное органическое Dissolved organic	Желто-бурая Yellow-brown	

Анализ жидкостей, применяемых для глушения скважин на месторождениях Тимано-Печорской нефтегазовой провинции, показывает, что технологические жидкости имеют существенное содержание ионов железа и это может являться основным фактором, влияющим на ухудшение фильтрационно-емкостных свойств коллекторов. Жидкости для глушения скважин Тимано-Печорской нефтегазовой провинции месторождений готовятся на основе пластовой воды. Пробы пластовой воды группы месторождений имеют содержание железа 60–70 мг/л.

Внешние признаки подтверждают высокое содержание окислов железа, пробы окрашены в характерный рыжий цвет с наличием хлопьевидного осадка.

С целью изучения влияния различных добавок в составе жидкости глушения на фильтрационно-емкостные свойства пласта и выявления подходов по предотвращению осложнений при ремонтных работах были поставлены следующие задачи:

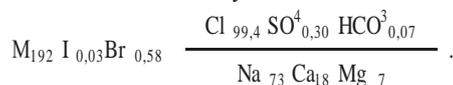
1. Исследование связывающей способности реагентов, применяемых для стабилизации соединений железа в жидкостях глушения.
2. Определение коэффициента восстановления проницаемости при фильтрационных исследованиях жидкостей глушения.

#### Материалы и методы

Основным компонентом применяемых жидкостей глушения на месторождениях Тимано-Печорской нефтегазовой провинции является пластовая вода. По результатам исследования проб пластовой воды установлено, что вода относится к хлоркальциевому типу и является сильно минерализованной подземной водой (рассолом).

Результаты анализа химического состава подземных вод принято представлять в виде формулы Курлова. Эта формула дает обобщенную характеристику химического состава единичного анализа воды.

Пробы пластовой воды в пределах месторождения не имеют значительных различий по химическому составу. В табл. 2 приведены результаты анализа одной из проб пластовой воды. Формула Курлова данной пробы воды имеет следующий вид:



**Таблица 2.** Анализ химического состава пластовой воды

**Table 2.** Analysis of reservoir water chemical composition

Компонент Component	Содержание, мг/дм <sup>3</sup> Content, mg/dm <sup>3</sup>	Содержание, мг-экв/дм <sup>3</sup> Content, mg-eq/dm <sup>3</sup>	Содержание, %-экв/дм <sup>3</sup> Content, %-eq/dm <sup>3</sup>
Na <sup>+</sup>	55459,90	2412,37	73,26
K <sup>+</sup>	2212,00	56,57	1,72
Ca <sup>2+</sup>	11843,64	591,00	17,95
Mg <sup>2+</sup>	2633,45	216,70	6,58
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	230,00	12,75	0,39
Fe <sub>общ</sub>	63,25	3,40	0,10
Сумма катионов Cation sum:	74306,16	3395,97	100,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	164,75	2,70	0,08
Cl <sup>-</sup>	119722,48	3376,94	99,40
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	479,83	9,99	0,29
J	25,38	0,20	0,01
Br <sup>-</sup>	594,07	7,43	0,22
SiO <sub>2</sub>	25,89	–	–
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	342,60	–	–
Сумма анионов Anion sum:	121355,00	3397,26	100,00
pH	6,65		
Плотность/Density	1,1366		
Мутность/Turbidity	Прозрачная/Transparent		
Цветность/Chroma	Бесцветная/Colorless		

Исследование связывающей способности реагентов, применяемых для стабилизации соединений железа в жидкостях глушения

Для исследования были приготовлены пробы жидкостей глушения скважин на основе проб пластовой воды. Выпадение окисных форм железа ( $Fe^{3+}$ ) из воды, используемой для приготовления жидкости глушения, является одной из причин снижения коэффициента продуктивности скважин [20–24]. В ходе исследования производился компонентный анализ для количественной оценки наличия растворенных форм железа в пробах жидкостей глушения, приготовленных на основе пластовой воды.

При приготовлении изучаемых жидкостей глушения для выдачи рекомендаций по снижению негативного эффекта использовались реагенты, препятствующие выпадению железа путем связывания ионов в растворимые и устойчивые к окислению кислородом соединения [25, 26]. Химический метод связывания железа был выбран из-за его высокой скорости [27–29].

В качестве реагентов применялись хорошо известные и достаточно широко распространенные составы: оксиэтилидендифосфоновая кислота (ОЭДФ) и композиция АКСИС-КС. Основной проблемой при проведении ремонтных работ в скважинах является осаждение соединений железа в призабойной зоне. ОЭДФ используется в качестве ингибитора солеотложений и стабилизатора ионов железа в нефтедобывающей промышленности. Композиция АКСИС-КС применяется в качестве реагента комплексного воздействия, в том числе для стабилизации ионов железа. Таким образом, было принято решение провести исследование с данными реагентами. Концентрация веществ в растворах составляла 2 г/дм<sup>3</sup>. Аналогичные рецептуры применяются на месторождениях Западной Сибири.

Анализ устойчивости соединений проводился как на реальной пластовой воде, так и на модели, полученной путем внесения хлорида железа в воду. Содержание железа в модельной воде выбрано в количестве, соответствующем его содержанию в отбираемых пробах пластовой воды для приготовления жидкости глушения, и составляло 70 мг/л.

Методика эксперимента состояла в определении изменения оптической плотности исследуемой жидкости, как с внесенными реагентами, так и без них, при проведении окисления кислородом воздуха. Определение проводилось на приборе КФК-2 при длине волны 590 нм в кювете с толщиной слоя жидкости 30,07 мм. В ходе исследования также определялся коэффициент светопропускания исследуемых жидкостей.

Определение коэффициента восстановления проницаемости при фильтрационных исследованиях

Исследования влияния жидкости глушения на изменение проницаемости коллектора проводили на естественных керновых моделях пласта. Эффективность составов определялась по изменению фазовой проницаемости по нефти, определённой до и после фильтрации жидкости глушения через образец керна.

Результат выражался в виде коэффициента восстановления проницаемости – отношения проницаемости после воздействия к начальному значению.

Опыт состоит из нескольких стадий. На первой стадии через образец керна прокачивали не менее пяти поровых объёмов нефти в прямом направлении. Затем, согласно ОСТ-39-195-86 [30], нефтенасыщенный образец оставляли на сутки в статическом режиме; после продолжали фильтрацию нефти до стабилизации перепада давления, определяли фазовую проницаемость по нефти при связанной воде. На втором этапе исследуемая жидкость глушения прокачивалась через образец в обратном направлении до стабилизации процесса. На третьем этапе в прямом направлении продолжали прокачивать нефть аналогично первому этапу опыта и определяли фазовую проницаемость по нефти уже после воздействия. По полученным данным определяли коэффициент восстановления проницаемости.

В качестве основы для приготовления жидкости глушения использовалась пластовая вода, отобранная на месторождении. При проведении исследований использовались естественные керны, отобранные из двух скважин этого же месторождения Тимано-Печорской нефтегазовой провинции. Керны подготавливались для фильтрационных исследований жидкостей глушения согласно требованиям ОСТ 39-195-86. Образцы керна были проэкстрагированы в аппаратах Сокслета, соли с образцов удалены дистиллированной водой, после образцы были высушены в сушильном шкафу. Для отбора кернов с сопоставимыми фильтрационно-ёмкостными свойствами определялась абсолютная проницаемость по воздуху и открытая пористость. Далее на основании полученных значений фильтрационно-ёмкостных свойств были выбраны четыре образца, основные характеристики которых представлены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики керновых моделей месторождения

Table 3. Characteristics of field core models

№ опыта Experiment no.	Проницаемость по воздуху, мкм <sup>2</sup> Permeability by air, $\mu m^2$	Длина образца Sample length	Диаметр образца Sample diameter	Пористость Porosity	Количество связанной воды Bound water
1	0,00180	2,96		8,62	32,05
2	0,00158			7,85	32,26
3	0,00160			7,66	32,18
4	0,00208			8,52	32,28

Отметим, что основные линейные и фильтрационно-ёмкостные характеристики (длина, пористость, проницаемость, начальная водонасыщенность) использовавшихся пористых сред близки, что позволяет корректно сравнивать между собой результаты опытов. Значение остаточной водонасыщенности в образцах выбиралось исходя из петрофизической зависимости данного объекта разработки, применялся метод центрифугирования.

Цель исследования фильтрационных характеристик заключается в получении значений относительной фазовой проницаемости по нефти до и после воздействия исследуемыми жидкостями глушения на образцы керна с сопоставимыми фильтрационно-емкостными свойствами и определении по результатам опытов коэффициентов восстановления проницаемости для каждого исследуемого агента.

При проведении опытов начальная водонасыщенность создавалась с использованием пробы пластовой воды месторождения (минерализация 180 г/л; плотность 1,126 г/см<sup>3</sup>).

Растворы глушения готовились на основе представленной пластовой воды, в соответствии с технологией их приготовления на промысле. Согласно регламенту, пластовую воду разбавляли пресной водой юрского горизонта до требуемой плотности. При пластовой температуре 85 °С жидкость глушения имела вязкость 0,4 мПа·с.

В качестве вытесняемой жидкости была использована изовязкозная модель нефти, приготовленная добавлением керосина к безводной дегазированной нефти месторождения. При пластовой температуре 85 °С модель

нефти имела вязкость 1,32 мПа·с, плотность 0,787 г/см<sup>3</sup>. Фильтрационные исследования выполнялись на установке для исследования керна УИК-5(7).

Так как для проведения фильтрации использовался раствор, приготовленный на пластовой воде с уже выпавшим осадком, базовый опыт, моделирующий промысловые условия, при которых проницаемость ПЗП снижалась на порядок, не проводили.

Скорость закачки на всех этапах поддерживалась постоянной и составляла 0,72 см<sup>3</sup>/ч. На рис. 2–5 показаны графики изменения перепада давления в процессе фильтрационных исследований.

### Результаты

Общая концентрация ионов железа в пробе пластовой воды составила 70 мг/л. Внесение реагентов в растворы проводилось одновременно с хлоридом железа. Растворение проводилось в отстоянной жидкости глушения. Определение оптической плотности и коэффициента светопропускания жидкостей глушения и модели пластовой воды производилось на приборе КФК-2 в стандартных условиях. Результаты данных исследований приведены в табл. 4.

Таблица 4. Оптическая плотность изучаемых жидкостей при окислении кислородом

Table 4. Optical density of the studied liquids during oxidation

Время, мин/Time, min		0	5	10	20	25	60
Аксис-КС 2 % Axis-KS2 %	коэффициент светопропускания, % light transmittance coefficient, %	88	85,5	83	81,5	79	66
	оптическая плотность, ед optical density, units	0,056	0,068	0,081	0,089	0,102	0,180
Оксиэтилендифосфоновая кислота (ОЭДФ) 2 % Oxyethylene diphosphonic acid (OEDF) 2 %	коэффициент светопропускания, % light transmittance coefficient, %	92	92,2	92,75	93	93,5	94
	оптическая плотность, ед optical density, units	0,036	0,035	0,033	0,032	0,029	0,027
Модель жидкости глушения с ионами железа Well-killing fluid model with iron ions	коэффициент светопропускания, % light transmittance coefficient, %	71	54,5	38,9	26	12,8	10,5
	оптическая плотность, ед optical density, units	0,149	0,264	0,410	0,585	0,893	0,979

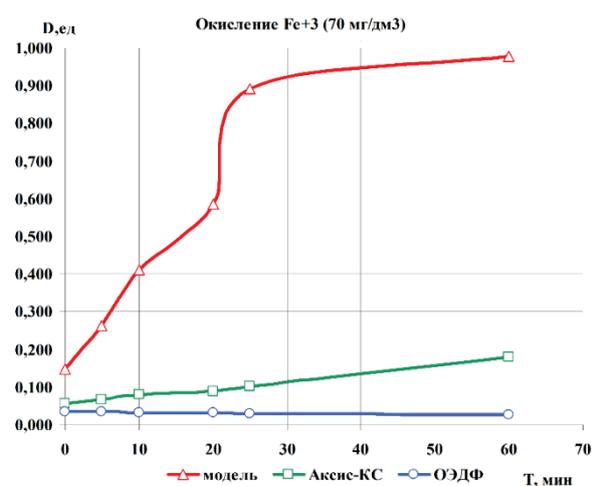


Рис. 1. Изменение оптической плотности растворов, содержащих ионы Fe<sup>3+</sup> при барботировании воздухом

Fig. 1. Change in the optical density of solutions containing Fe<sup>3+</sup> ions during air bubbling

На рис. 1 представлена графически зависимость изменения оптической плотности протестированных растворов от времени продувания воздухом.

Полученные результаты изменения оптической плотности растворов на представленном графике характеризуют устойчивость к выпадению из них соединений железа. Жидкость глушения с высоким содержанием ионов железа на воздухе существенно изменяет оптическую плотность, что указывает на выпадение окислов железа. Применение реагентов делает растворы устойчивыми к выпадению из них соединений железа. Анализ полученных данных позволяет говорить об эффективности применения реагента ОЭДФ и композиции АКЦИС-КС для осветления и стабилизации жидкости глушения с содержанием гидратируемых ионов железа в концентрации до 70 мг/дм<sup>3</sup>.

Параллельно с определением оптической плотности проводились исследования растворов на термосолевую агрессию для исключения её проявления при пластовых условиях. Следует указать, что при проведении опытов на термосолевую агрессию реагент АКЦИС-КС показал себя как неустойчивый при

нагревании до температуры 85 °С. Жидкость глушения, содержащая АКСИС-КС, после нагревания в течение 45 минут помутнела и стала молочно-белой с последующим появлением осадка на дне сосуда.

Таким образом, для применения в составе жидкостей глушения в условиях месторождений Тимано-Печорской нефтегазовой провинции по результатам исследований оптической плотности растворов наиболее оптимальным реагентом из рассмотренных оказался реагент ОЭДФ в концентрации 2 г/дм<sup>3</sup> при содержании до 70 мг/дм<sup>3</sup> ионов железа (Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>).

Определение коэффициента восстановления проницаемости при фильтрационных исследованиях жидкостью глушения

Проведены четыре опыта в рамках фильтрационных исследований реагентов для стабилизации соединений железа в жидкостях глушения.

#### Опыт 1 (базовый)

Цель опыта – определение коэффициента восстановления проницаемости по нефти после фильтрации жидкости глушения без добавок. Динамика измене-

ния основных показателей закачки и вытеснения в опыте № 1 приведена на рис. 2.

В модель пористой среды № 1 (табл. 2) с начальной нефтенасыщенностью 67,95 % с проницаемостью при связанной воде по керосину 0,00058 мкм<sup>2</sup>, по нефти 0,00024 мкм<sup>2</sup>, закачивалась жидкость глушения (из которой были предварительно отфильтрованы гидроокиси железа) в направлении обратном направлению фильтрации нефти при постоянной скорости движения жидкости, равной 0,72 см<sup>3</sup>/ч (этап 2). Всего жидкости глушения было закачено около 5 объемов пор. На завершающей стадии закачки градиент давления стабилизировался и составил 9,52 МПа/м. Фазовая проницаемость по жидкости глушения при остаточной нефтенасыщенности составила 0,00001 мкм<sup>2</sup>.

Далее была возобновлена фильтрация нефти в первоначальном направлении с тем же расходом (этап 3). После закачки нефти в количестве четырех объемов пор градиент давления стабилизировался на уровне 1,96 МПа/м (рис. 2). Фазовая проницаемость по нефти составила 0,00019 мкм<sup>2</sup>. Коэффициент восстановления проницаемости по нефти составил 0,79.

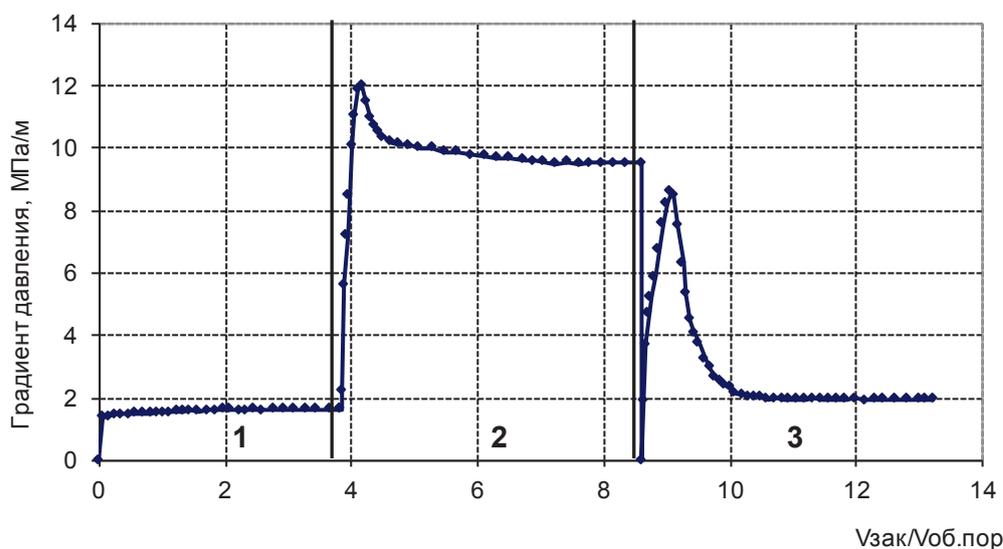


Рис. 2. Динамика изменения основных показателей закачки и вытеснения в опыте № 1: 1 – фильтрация нефти в прямом направлении; 2 – фильтрация жидкости глушения в обратном направлении; 3 – возобновление фильтрации нефти в прямом направлении

Fig. 2. Dynamics of changes in key indicators in injection and displacement in experiment no. 1: 1 is the oil filtration in the forward direction; 2 is the filtration of killing fluid in the opposite direction; 3 is the resumption of oil filtration in the forward direction

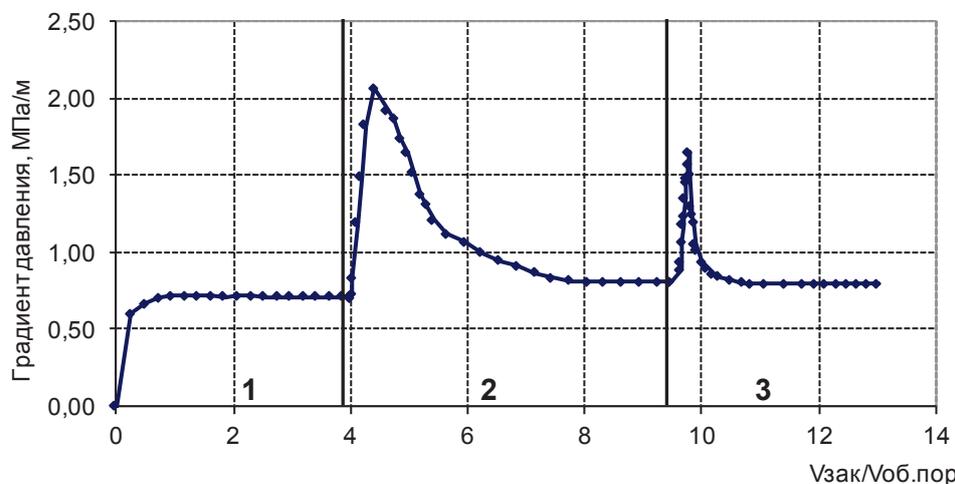
#### Опыт 2

Цель опыта – определение коэффициента восстановления проницаемости по нефти после фильтрации 1,0 % раствора Нефтенол-К в жидкости глушения. Нефтенол-К представляет собой многокомпонентную смесь анионных и катионных поверхностно-активных веществ (ПАВ) различного химического строения; применяется в качестве добавки в жидкости глушения, что способствует снижению набухаемости глин и гидрофобизации породы. Динамика изменения основных показателей закачки и вытеснения в опыте № 2 приведена на рис. 3.

В модель пористой среды № 2 (табл. 2) с начальной нефтенасыщенностью 67,74 % и проницаемостью при связанной воде по керосину 0,00071 мкм<sup>2</sup>, по нефти 0,00055 мкм<sup>2</sup> закачивался 1 % раствор Нефтенол-К в направлении обратном направлению фильтрации нефти при постоянной скорости движения жидкости, равной 0,72 см<sup>3</sup>/ч. Всего раствора было закачено около пяти объемов пор. На завершающей стадии закачки градиент давления стабилизировался и составил 0,80 МПа/м. Фазовая проницаемость по раствору при остаточной нефтенасыщенности составила 0,00014 мкм<sup>2</sup>.

Далее была возобновлена фильтрация нефти в первоначальном направлении с тем же расходом. После закачки нефти в количестве около трех объемов пор градиент давления стабилизировался на уровне

0,79 МПа/м (рис. 3). Фазовая проницаемость по нефти составила 0,00049 мкм<sup>2</sup>. Коэффициент восстановления проницаемости по нефти составил 0,89.



**Рис. 3.** Динамика изменения основных показателей закачки и вытеснения в опыте № 2: 1 – фильтрация нефти в прямом направлении; 2 – фильтрация 1,0 % р-ра Нефтенол-К в обратном направлении; 3 – возобновление фильтрации нефти в прямом направлении

**Fig. 3.** Dynamics of changes in key indicators injection and displacement in experiment no. 2: 1 is the oil filtration in the forward direction; 2 is the filtration of 1,0 % Neftenol-K solution in the opposite direction; 3 is the resumption of oil filtration in the forward direction

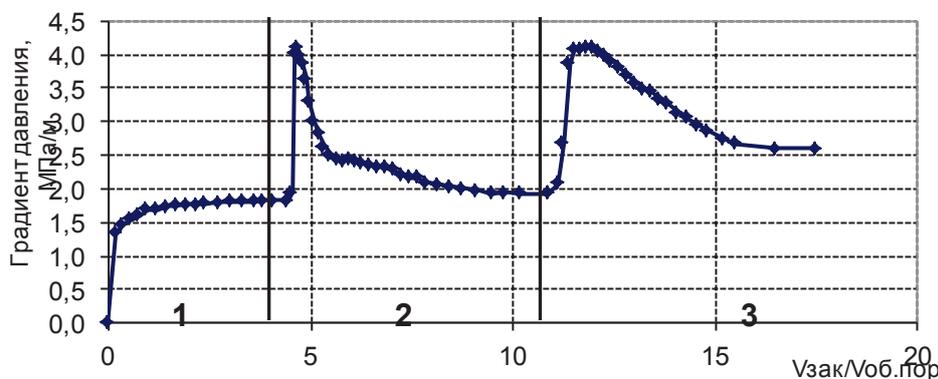
#### Опыт 3

Цель опыта – определение коэффициента восстановления проницаемости по нефти после фильтрации 1,0 % раствора Нефтенол-ВКС в жидкости глушения. Нефтенол-ВКС был выбран как ПАВ, улучшающее смачиваемость коллектора. Динамика изменения основных показателей закачки и вытеснения в опыте № 3 приведена на рис. 4.

В модель пористой среды № 3 (табл. 2) с начальной нефтенасыщенностью 67,82 % с проницаемостью при связанной воде по керосину 0,00048 мкм<sup>2</sup>, по нефти 0,00021 мкм<sup>2</sup> закачивался 1,0 % раствор Нефтенол-ВКС в направлении обратном направлению фильтрации нефти при постоянной скорости движе-

ния жидкости, равной 0,72 см<sup>3</sup>/ч. Всего раствора было закачано около шести объемов пор. На завершающей стадии закачки градиент давления стабилизировался и составил 1,93 МПа/м. Фазовая проницаемость по раствору при остаточной нефтенасыщенности составила 0,00006 мкм<sup>2</sup>.

Далее была возобновлена фильтрация нефти в первоначальном направлении с тем же расходом. После закачки нефти около пяти объемов пор градиент давления стабилизировался на уровне 2,60 МПа/м (рис. 4). Фазовая проницаемость по нефти составила 0,00015 мкм<sup>2</sup>. Коэффициент восстановления проницаемости по нефти составил 0,71.



**Рис. 4.** Динамика изменения основных показателей закачки и вытеснения в опыте № 3: 1 – фильтрация нефти в прямом направлении; 2 – фильтрация 1,0 % р-ра Нефтенол-ВКС в обратном направлении; 3 – возобновление фильтрации нефти в прямом направлении

**Fig. 4.** Dynamics of changes in key indicators injection and displacement in experiment no. 3: 1 is the oil filtration in the forward direction; 2 is the filtration of 1,0 % Neftenol-VKS solution in the opposite direction; 3 is the resumption of oil filtration in the forward direction

#### Опыт 4

Цель опыта – определение коэффициента восстановления проницаемости по нефти после фильтрации 2,0 % раствора ОЭДФ в жидкости глушения, содержащей 70 мг/л ионов железа. Динамика изменения основных показателей закачки и вытеснения в опыте № 4 приведена на рис. 5.

В модель пористой среды № 4 (табл. 2) с начальной нефтенасыщенностью 67,72 % с проницаемостью при

связанной воде по керосину  $0,00052 \text{ мкм}^2$ , по нефти  $0,00025 \text{ мкм}^2$ , закачивался 2,0 % раствор ОЭДФ (с 70 мг/л ионов Fe) в направлении обратном направлению фильтрации нефти при постоянной скорости движения жидкости, равной  $0,72 \text{ см}^3/\text{ч}$ . Всего раствора было закачено около пяти объемов пор. На завершающей стадии закачки градиент давления стабилизировался и составил 2,01 МПа/м. Фазовая проницаемость по раствору при остаточной нефтенасыщенности составила  $0,00006 \text{ мкм}^2$ .

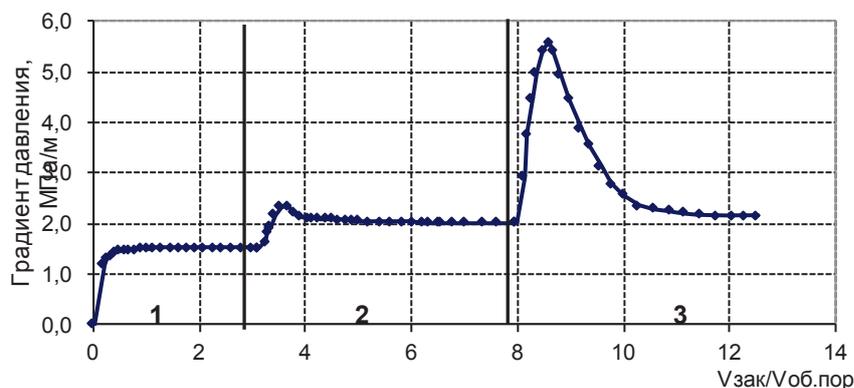


Рис. 5. Динамика изменения основных показателей закачки и вытеснения в опыте № 4: 1 – фильтрация нефти в прямом направлении; 2 – фильтрация 2,0 % р-ра ОЭДФ в обратном направлении; 3 – возобновление фильтрации нефти в прямом направлении

Fig. 5. Dynamics of changes in key indicators injection and displacement in experiment no. 4: 1 is the oil filtration in the forward direction; 2 is the filtration of 2,0 % of the HEDF solution in the opposite direction; 3 is the resumption of oil filtration in the forward direction

Далее была возобновлена фильтрация нефти в первоначальном направлении с тем же расходом. После закачки нефти свыше четырех объемов пор градиент давления стабилизировался на уровне 2,17 МПа/м (рис. 5). Фазовая проницаемость по нефти составила  $0,00021 \text{ мкм}^2$ . Коэффициент восстановления проницаемости по нефти составил 0,84.

В сравнении с результатом базового опыта, для которого коэффициент восстановления проницаемости составил 0,79, результат, полученный с раствором, содержащим стабилизированные ОЭДФ ионы железа ( $K_{\text{восст.}}=0,84$ ), можно объяснить тем, что происходит адсорбция ОЭДФ, что способствует гидрофилизации поверхности порового пространства горной породы. Стоит отметить наличие слабых кислотных свойств реагента ОЭДФ, которые способствуют растворению карбонатных пород-коллекторов, что могло повлиять на значения проницаемости при фильтрационных исследованиях. Основные результаты опытов по определению коэффициента восстановления проницаемости по нефти приведены в табл. 5.

Как видно из результатов проведенного фильтрационного тестирования (табл. 5), при использовании жидкости глушения без добавления стабилизаторов железа коэффициент восстановления проницаемости по нефти достаточно высок ( $K_{\text{восст.}}=0,79$ ). Данное обстоятельство свидетельствует об отсутствии серьезной проблемы коагуляции ПЗП в результате проникновения жидкости глушения за счет эффекта капиллярного зацемячения. То есть проблема «водной блокады» призабойной зоны пласта с кратным сни-

жением дебита по нефти, как в условиях низкопроницаемых гидрофильных коллекторах, здесь отсутствует, а причина коагуляции ПЗП связана с другими факторами.

Добавка к жидкости глушения 1,0 % раствора гидрофобизатора Нефтенол-К несколько улучшает фильтрационные свойства пористой среды для нефти ( $K_{\text{восст.}}=0,89$ ). Необходимо отметить, что Нефтенол-К является комплексным реагентом и сильным модификатором поверхности.

Добавка к жидкости глушения 1,0 % раствора Нефтенол-ВКС не увеличила коэффициент восстановления проницаемости в сравнении с базовым опытом. Наоборот наблюдалось снижение проницаемости.

При использовании жидкости глушения с содержанием железа 70 мг/л, и стабилизатора ОЭДФ 2,0 % (опыт № 4) коэффициент восстановления проницаемости по нефти также достаточно высок ( $K_{\text{восст.}}=0,84$ ).

#### Обсуждение

Для коррекции и улучшения свойств жидкостей глушения и промывочных жидкостей в их состав добавляются различные ПАВ, придающие им гидрофобизирующие, моющие и ингибирующие свойства. Применение ПАВ в жидкостях глушения обеспечивает более легкое освоение скважин и способствует выносу водной фазы из призабойной зоны пласта, удалению механических примесей и асфальтосмолопарафиновых отложений с забоя скважины, сохраняя тем самым добычный потенциал скважины после проведения подземного ремонта.

**Таблица 5.** Результаты фильтрационных исследований жидкостей

**Table 5.** Results of filtration studies of liquids

№ опыта Experiment no.	Вытесняющий агент Displacing agent	Проницаемость пористых сред, $\mu\text{м}^2$ Permeability of porous media, $\mu\text{m}^2$				Проницаемость по нефти (фазовая) после воздействия, $\mu\text{м}^2$ Oil permeability (phase) after treatment, $\mu\text{m}^2$	Коэффициент восстановления проницаемости по нефти, доли ед. Oil permeability restoring coefficient, share units
		По воз- духу By air	По керосину (фазовая) при связанной воде For kerosene (phase) with bound water	По нефти (фазовая) при связанной воде By oil (phase) with bound water	По жидкости глушения (фазовая) при связанной нефти Killing fluid (phase) with associated oil		
1	Жидкость глушения Well-killing fluid	0,00180	0,00058	0,00024	0,00001	0,00019	0,79
2	Жидкость глушения + 1 % Нефтенол-К Well-killing fluid + 1 % Neftenol-K	0,00158	0,00071	0,00055	0,00014	0,00049	0,89
3	Жидкость глушения + 1 % Нефтенол-ВКС Well-killing fluid + 1 % Neftenol-VKS	0,00160	0,00048	0,00021	0,00006	0,00015	0,71
4	Жидкость глушения (70 мг/л ионов Fe) + 2 % ОЭДФ Well-killing fluid (70 mg/l Fe ions) + 2 % HEDP	0,00208	0,00052	0,00025	0,00006	0,00021	0,84

Для решения проблемы снижения фильтрационных характеристик ПЗП необходимо значительно снизить содержание железа в жидкости глушения или предотвратить его выпадение одним из нескольких способов:

- отказ от использования пластовой воды фаменского горизонта, содержащей значительные количества растворенного железа (выше 70 мг/л) при приготовлении жидкостей глушения;
- применение реагентов стабилизаторов, связывающих железо в устойчивые соединения.

Наилучший результат при фильтрационных исследованиях показала жидкость, модифицированная Нефтенолом-К. Однако следует отметить, что для испытания использовалась жидкость глушения без дополнительного внесения ионов железа в раствор. Нефтенол-К эффективен для применения в жидкостях глушения, приготовленных на основе пластовых вод с низким содержанием железа, ввиду его комплексного действия.

Наиболее высокую эффективность по совокупности результатов исследований показал реагент ОЭДФ: показан высокий коэффициент восстановления проницаемости по нефти и эффективность предотвращения выпадения нерастворимых в воде соединений железа при определении оптической плотности и величины светопропускания растворов. Согласно результатам фильтрационных исследований, реагент ОЭДФ эффективен при высоких содержаниях ионов железа в жидкости глушения. Данную добавку можно рекомендовать для стабилизации железа в жидкости глушения в условиях карбонатного коллектора со схожим химическим составом пластовых вод.

Следует отметить, что воды фаменского горизонта содержат значительное количество железа – 60–70 мг/л. Предоставленная проба жидкости глушения при поступлении в лабораторию уже содержала осадок гидроокиси железа в виде хлопьев бурового цвета, который продолжал образовываться при взаимодействии с кислородом воздуха по мере хранения. Вследствие того, что все технологические жидкости перед лабораторными исследованиями фильтруются через бумажный фильтр от механических примесей, а жидкость глушения была дополнительно пробарботирована, эффект выпадения гидроокиси железа в пористой среде не рассматривался. Однако в реальных условиях этот эффект будет доминировать, что, безусловно, приводит к кольматации ПЗП при глушении скважины. В случае значительного загрязнения и снижения проницаемости ПЗП проводят солянокислотные обработки, но желательно предотвратить снижение проницаемости подбором специальных рецептур жидкостей глушения.

При невозможности отказа от использования воды фаменского яруса при приготовлении жидкости глушения необходимо предотвратить выпадение гидроокиси железа добавлением в растворы реагентов-стабилизаторов.

#### Заключение

Результаты физико-химических и фильтрационных исследований добавок в жидкости глушения позволяют сделать следующие выводы. Применяемая жидкость глушения на основе пластовой воды содержит значительное количество растворенного железа, что приводит к возникновению проблем в виде кольматации ПЗП, образующейся дисперсией гидроокиси

трехвалентного железа при окислении кислородом воздуха.

Учитывая совокупность результатов лабораторных исследований, следует рекомендовать приготовление жидкости глушения с использованием реагентов, стабилизирующих выпадение соединений железа.

На основании проведенных экспериментов по фильтрации для снижения негативного влияния растворенного железа можно рекомендовать к использо-

ванию стабилизатор железа ОЭДФ в концентрации 2,0 % (при содержании ионов железа до 70 мг/л) и гидрофобизатор комплексного действия Нефтенол-К в концентрации 1 %. Реагент ОЭДФ дополнительно имеет положительные результаты исследований по устойчивости к термосолевой агрессии. Добавление реагентов ПАВ (Нефтенол-К и других) в жидкость глушения необходимо проводить только после введения стабилизатора ионов железа ОЭДФ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы применения многофункциональных жидкостей глушения скважин в карбонатных пластах / Ю.В. Зейгман, В.Ш. Мухаметшин, А.Р. Хафизов, С.Б. Харина // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – С. 33–39.
2. Гладков П.Д., Рогачев М.К. Выбор технологической жидкости для глушения скважин перед подземным ремонтом на Приобском нефтяном месторождении // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 2. – С. 175–182.
3. Wang L. Clay stabilization in sandstone reservoirs and the perspectives for shale reservoirs // Advances in Colloid and Interface Science. – 2020. – V. 276. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102087> (дата обращения: 01.02.2023).
4. Фахретдинов Р.Н., Земцов Ю.В., Новоселов Т.С. Гидрофобизация призабойной зоны гидрофильных коллекторов // Нефтяное хозяйство. – 1999. – № 4. – С. 29–30.
5. Tagirov K.M. Foaming well-killing composition based on organic foam and CaCl<sub>2</sub> for oil and gas wells // Fuel and Energy Abstracts. – 2002. – № 43 (4). – P. 241. URL: [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(02\)86116-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(02)86116-1) (дата обращения: 01.02.2023).
6. Patel H., Santra A., Thaelitz C. Functionalized layered nanomaterials: a next-generation shale inhibitor // International Petroleum Technology Conference. – Dhahran: IPTC, 2020. – 9 p.
7. Сентемов А.А., Дорфман М.Б., Румянцев И.С. Анализ характера насыщения продуктивных пластов методом диаграмм Пикетта в карбонатных коллекторах // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 6 (366). – С. 41–45.
8. Hu Jia, Xiaohu Wu. Killing fluid loss mechanism and productivity recovery in a gas condensate reservoir considering the phase behavior change // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – V. 44 (4). – P. 659–666.
9. Preparations for foam gas shut off in carbonate reservoirs / A. Skauge, M. Aarra, P. Ormehaug, J. Solbakken, K. Mogensen, S. Masalmeh // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. OnePetro. – Abu Dhabi, UAE, 2019. – 13 p.
10. Демахин С.А., Меркулов А.П., Касьянов Д.Н. Щадящее глушение скважин как основа сохранения коллекторских свойств паста // Нефтегазовая вертикаль. – 2016. – № 6. – С. 94–96.
11. Бондаренко В.П., Надиров К.С., Голубев В.Г. Исследования свойств водонефтяных обратных эмульсий, применяемых для глушения скважин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 01. – С. 58–60.
12. A novel foamy well killing fluid for low-pressure gas reservoirs in Tarim Basin, China / L. Pan, H. Liu, W. Long, J. Li, Q. Liu // International Petroleum Technology Conference. – OnePetro. – Virtual, March 2021. – 12 p.
13. Study of gel plug for temporary blocking and well-killing technology in low-pressure, leakage-prone gas well / X. Ying, X. Yuan, Z. Yadong, F. Ziyi // SPE Production & Operations. – 2021. – V. 36. – № 01. – P. 234–244.
14. Технологические основы освоения и глушения нефтяных и газовых скважин / Ю.М. Басаргин, В.Ф. Будников, А.И. Булатов, Ю.М. Проселков. – М.: Изд-во ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 543 с.
15. Глушенко В.Н. К вопросу обработки призабойных зон скважин катионными ПАВ // Геология, геофизика и разработка месторождений. – 1995. – № 1. – С. 50–53.
16. Vaspayev Y.T., Rzaeva S.D. Analysis of the well killing fluids effect on the filtration properties of the rocks of the «Uzen» field // SOCAR Proceedings. – 2018. – № 3. – P. 38–44.
17. Developing nanocomposite gels from biopolymers for leakage control in oil and gas wells / A. Yudhijoy, R. Rafati, A. Haddad, D. Pokrajac, M. Manzari // SPE Offshore Europe Conference and Exhibition. OnePetro. – Aberdeen, UK, September, 2019. – 12 p.
18. Van T.N., Aleksandrov A.N., Rogachev M.K. An extensive solution to prevent wax deposition formation in gas-lift wells // Journal of Applied Engineering Science. – 2022. – V. 20 (1). – P. 264–275.
19. Двойников М.В., Будовская М.Е. Разработка углеводородной системы заканчивания скважин с низкими забойными температурами для условий нефтегазовых месторождений Восточной Сибири // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 12–22.
20. Фильтрационное тестирование нового поколения поверхностно-активных веществ отечественного и зарубежного производства в качестве добавок к ремонтно-технологическим жидкостям при проведении подземных ремонтов и ОПЗ скважин в гидрофильных коллекторах / А.М. Хакимов, А.К. Макатров, А.Д. Караваев, А.Г. Телин // Нефтепромысловое дело. – 2005. – № 12. – С. 48–53.
21. Risk assessment on deepwater drilling well control based on dynamic Bayesian network / Zengkai Liu, Qiang Ma, Baoping Cai, Yonghong Liu, Chao Zheng // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – V. 149. – P. 643–654.
22. Modeling of wellbore multiphase flow with free gas influx during horizontal drilling in marine hydrate reservoirs / Youqiang Liao, Qian Sun, Zhiyuan Wang, Xiaohui Sun, Wenqiang Lou, Baojiang Sun // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2022. – V. 97. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104375> (дата обращения: 01.02.2023).
23. Well control and management: killing fluids for oil fields of JSOC Bashneft / Al.A. Karpov, S.A. Vakhrushev, M.R. Sitdikov, S.E. Zdolnik, A.M. Kuzmin // SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition. – Moscow, 2014. URL: <https://doi.org/10.2118/171308-MS> (дата обращения: 01.02.2023).
24. Effect of liquid viscosity on the gas-liquid two phase countercurrent flow in the wellbore of bullheading killing / Hui Liu, Hongtao Liu, Quan Zhang, Ming Fan, Bangtang Yin, Xuerui Wang, Xiaohui Sun, Zhiyuan Wang // Geoenergy Science and Engineering. – 2023. – V. 221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpetrol.2022.111274> (дата обращения: 01.02.2023).
25. Гидрофобизация пород ПЗП как метод увеличения дебитов скважин и уменьшения обводненности добываемой жидкости / А.Ш. Газизов, Р.Г. Ханнанов, А.А. Газизов Фэн Фан, М.М. Кабиров // Нефтегазовое дело. – 2005. – № 1. – С. 1–12.
26. Synthesis, characterization and evaluation of long-acting hyperbranched cationic polymer clay stabilizer used in water flooding / Q. Feng, H. Liu, Z. Peng, Y. Zheng // Polymer Testing. – 2020. – V. 82. – 11 p.
27. Martyushev D.A., Govindarajan S.K. Development and study of a visco-elastic gel with controlled destruction times for killing oil wells // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2022. – V. 34. – Iss. 7. – P. 408–415.
28. Intelligent well killing control method driven by coupling multiphase flow simulation and real-time data / Zhi Zhang, Baojiang Sun, Zhiyuan Wang, Shaowei Pan, Wenqiang Lou, Dalin Sun // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 213. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpetrol.2022.110337> (дата обращения: 01.02.2023).
29. Preparation, characterization and application of environment-friendly high density and low damage solid free completion fluids

for completing HTHP oil and gas wells / Huo Jinhua, Zhang Xing, Che Yuanjun, Yu Baisong, Zhang Jian, Wang Xuemin, Liu Wei, Wu Zhansheng, Zhang Ruizhi // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – V. 221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jgeoen.2022.211351> (дата обращения: 01.02.2023).

30. ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. – М.: Миннефтепрома, 1986. – 16 с.

*Поступила: 05.02.2023 г.*

*Прошла рецензирование: 14.03.2023 г.*

#### **Информация об авторах**

**Сентемов А.А.**, аспирант кафедры бурения скважин, разработки нефтяных и газовых месторождений Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

**Дорфман М.Б.**, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин, разработки нефтяных и газовых месторождений Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

UDC 622.276.63

## WELL-KILLING FLUID INFLUENCE ON DECLINE OF PERMEABILITY DURING WELL COMPLETION IN CARBONATE RESERVOIRS

Andrey A. Sentemov<sup>1</sup>,  
sentemov.a.a@yandex.ru

Mikhail B. Dorfman<sup>1</sup>,  
m.dorfman@narfu.ru

<sup>1</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,  
17, Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russia.

**Relevance.** Carrying out repair operations in production and injection wells with improperly selected well-killing fluid can lead to significant decrease in the permeability of the bottomhole formation zone. The important problem of well operations is the preservation of reservoir filtration properties.

**The main aim** of this work is to study the effect of various additives in the well-killing fluid compositions on the reservoir properties and to identify approaches to prevent complications during workover and well servicing.

**Methods:** empirical and analytical methods. Under laboratory conditions, the chemical composition, optical density and light transmission coefficient of well-killing fluids and formation water were determined. Modeling of formation fluids filtration was performed on a core study unit.

**Results.** The main bottomhole zone permeability decrease reason during well-killing operations in the Timan-Pechora oil and gas province is the high iron ions content in formation waters. Formation waters of the Famennian horizon contain 60–70 mg/l of iron. To solve the problem of bottomhole zone filtration characteristics decline, it is necessary to significantly reduce the iron content in the well-killing fluids or prevent precipitation of iron compounds. Analysis of the solutions optical density results show effectiveness of the oxyethylene diphosphonic acid and AKSIS-KS for clarification and stabilization of well-killing fluids with the content of hydrated iron ions up to 70 mg/l. Based on the conducted filtration experiments, in order to reduce the negative effect of iron compounds on the permeability, it is recommended the use of an iron stabilizer oxyethylene diphosphonic acid 2.0 % (with an iron ion content up to 70 mg/l) and a hydrophobiser Neftenol-K 1 %.

### Key words:

Well-killing fluid, permeability, bottomhole formation zone, carbonate reservoirs, iron compounds.

### REFERENCES

1. Zejgman J.V., Mukhametshin V.Sh., Khafizov A.R., Kharina S.B. Prospects of application of multi-functional well killing fluids in carbonate reservoirs. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 33–39. In Rus.
2. Gladkov P.D., Rogachev M.K. Vybór tekhnologicheskoy zhidkosti dlya glusheniya skvazhin pered podzemnym remontom na Priobskom neftyanom mestorozhdenii [The choice of process fluid for well killing before underground workover at the Priobskoe oil field]. *Neftgazovo e delo*, 2012, no. 2, pp. 175–182.
3. Wang L. Clay stabilization in sandstone reservoirs and the perspectives for shale reservoirs. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, vol. 276. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102087> (accessed: 1 February 2023).
4. Fahretdinov R.N., Zemtsov Yu.V., Novoselov T.S. Gidrofobizatsiya prizaboynoy zony gidrofilnykh kollektorov [Hydrophobization of the bottomhole zone of hydrophilic reservoirs]. *Neftyanoe hozaystvo*, 1999, vol. 4, pp. 29–30.
5. Tagirov K.M. Foaming well-killing composition based on organic foam and CaCl<sub>2</sub> for oil and gas wells. *Fuel and Energy Abstracts*, 2002, vol. 43 (4), pp. 241. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(02\)86116-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(02)86116-1) (accessed: 1 February 2023).
6. Patel H., Santra A., Thaemlitz C. Functionalized layered nanomaterials: a next-generation shale inhibitor. *International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, IPTC Publ., 2020. 9 p.
7. Sentemov A.A., Dorfman M.B., Rumyanov I.S. Oil saturation analysis of productive formations applying the Pickett diagram method in carbonate reservoirs. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2022, no. 6 (366), pp. 41–45. In Rus.
8. Hu Jia, Xiaohu Wu. Killing fluid loss mechanism and productivity recovery in a gas condensate reservoir considering the phase behavior change. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 44 (4), pp. 659–666.
9. Skauge A., Aarra M., Ormehaug P., Solbakken J., Mogensen K., Masalmeh S. Preparations for foam gas shut off in carbonate reservoirs. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. OnePetro. Abu Dhabi, UAE, 2019. 13 p.
10. Demakhin S.A., Merkulov A.P., Kasyanov D.N. Gentle killing of wells as the basis for maintaining the reservoir properties. *Oil and Gas Vertical*, 2016, no. 6, pp. 94–96. In Rus.
11. Bondarenko V.P., Nadirov K.S., Golubev V.G., Kolesnikov A.S., Sadyrbaeva A.S. Study of a reagent-emulsifier for the preparation of reverse water-oil emulsions used for well-killing. *Oil industry*, 2017, no. 01, pp. 58–60. In Rus.
12. Pan L., Liu H., Long W., Li J., Liu Q. A novel foamy well killing fluid for low-pressure gas reservoirs in Tarim Basin. *China International Petroleum Technology Conference*. OnePetro. Virtual, March 2021. 12 p.
13. Ying X., Yuan X., Yadong Z., Ziyi F. Study of gel plug for temporary blocking and well-killing technology in low-pressure, leakage-prone gas well. *SPE Production & Operations*, 2021, vol. 36, pp. 234–244.
14. Basargin Yu.M., Budnikov V.F., Bulatov A.I., Proselkov Yu.M. *Tekhnologicheskie osnovy osvoeniya i glusheniya neftnykh i gazovykh skvazhin* [Technological bases for the development and killing of oil and gas wells]. Moscow, OOO «Nedra-Biznescentr» Publ., 2001. 543 p.
15. Glushchenko V.N. K voprosu obrabotki prizaboynykh zon skvazhin kationnymi PAV [On the issue of treatment of bottom-hole zones of wells with cationic surfactants]. *Geologiya, geofizika i razrabotka mestorozhdenij*, 1995, vol. 1, pp. 50–53.
16. Baspayev Y.T., Rzayeva S.D. Analysis of the well killing fluids effect on the filtration properties of the rocks of the «Uzen» field. *SOCAR Proceedings*, 2018, no. 3, pp. 38–44.
17. Yudhowijoyo A., Rafati R., Haddad A., Pokrajac D., Manzari M. Developing nanocomposite gels from biopolymers for leakage control in oil and gas wells. *SPE Offshore Europe Conference and Exhibition*. OnePetro. Aberdeen, UK, September, 2019. 12 p.
18. Van T.N., Aleksandrov A.N., Rogachev M.K. An extensive solution to prevent wax deposition formation in gas-lift wells. *Journal of Applied Engineering Science*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 264–275.
19. Dvoynikov M.V., Budovskaya M.E. Development of a hydrocarbon completion system for wells with low bottomhole temperatures for conditions of oil and gas fields in Eastern Siberia. *Journal of Mining Institute*, 2022, no. 253 (1), pp. 12–22.

20. Khakimov A.M., Makatrov A.K., Karavaev A.D., Telin A.G. Filtratsionnoe testirovanie novogo pokoleniya poverkhnostno-aktivnykh veshchestv otechestvennogo i zarubezhnogo proizvodstva v kachestve dobavok k remontno-tekhnologicheskim zhidkostyam pri provedenii podzemnykh remontov i OPZ skvazhin v gidrofilnykh kollektorakh [Filtration testing of a new generation of surfactants of domestic and foreign production as additives to repair and process fluids during underground repairs and BHT of wells in hydrophilic reservoirs]. *Neftepromyslovoe delo*, 2005, vol. 12, pp. 48–53.
21. Zengkai Liu, Qiang Ma, Baoping Cai, Yonghong Liu, Chao Zheng. Risk assessment on deepwater drilling well control based on dynamic Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 149, pp. 643–654.
22. Youqiang Liao, Qian Sun, Zhiyuan Wang, Xiaohui Sun, Wenqiang Lou, Baojiang Sun. Modeling of wellbore multiphase flow with free gas influx during horizontal drilling in marine hydrate reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, vol. 97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104375> (accessed: 1 February 2023).
23. Karpov A.A., Vakhruşev S.A., Sitdikov M.R., Zdolnik S.E., Kuzmin A.M. Well control and management: killing fluids for oil fields of JSOC Bashneft. *SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition*. Moscow, SPE Publ., 2014. Available at: <https://doi.org/10.2118/171308-MS> (accessed: 1 February 2023).
24. Hui Liu, Hongtao Liu, Quan Zhang, Ming Fan, Bangtang Yin, Xuerui Wang, Xiaohui Sun, Zhiyuan Wang. Effect of liquid viscosity on the gas–liquid two phase countercurrent flow in the wellbore of bullheading killing. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 221. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111274> (accessed: 1 February 2023).
25. Gazizov A.Sh., Khannanov R.G., Gazizov A.A., Fen Fan, Kabirov M.M. Gidrofobizatsiya porod PZP kak metod uvelicheniya debitov skvazhin i umensheniya obvodnennosti dobyvaemoy zhidkosti [Hydrophobization of BFZ rocks as a method of increasing well flow rates and reducing water cut of the produced fluid]. *Neftegazovoe delo*, 2005, vol. 1, pp. 1–12.
26. Feng Q., Liu H., Peng Z., Zheng Y. Synthesis, characterization and evaluation of long-acting hyperbranched cationic polymer clay stabilizer used in water flooding. *Polymer Testing*, 2020, vol. 82. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111274>. (accessed: 1 February 2023).
27. Martyushev D.A., Govindarajan S.K. Development and study of a visco-elastic gel with controlled destruction times for killing oil wells. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2022, vol. 34, no. 7, pp. 408–415.
28. Zhi Zhang, Baojiang Sun, Zhiyuan Wang, Shaowei Pan, Wenqiang Lou, Dalin Sun. Intelligent well killing control method driven by coupling multiphase flow simulation and real-time data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 213. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110337> (accessed: 1 February 2023).
29. Huo Jinhua, Zhang Xing, Che Yuanjun, Yu Baisong, Zhang Jian, Wang Xuemin, Liu Wei, Wu Zhansheng, Zhang Ruizhi. Preparation, characterization and application of environment-friendly high density and low damage solid free completion fluids for completing HTHP oil and gas wells. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 221. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geo.en.2022.211351> (accessed: 1 February 2023).
30. OST 39-195-86. *Neft. Metod opredeleniya koэфficienta vytesneniya nefi vodoy v laboratornykh usloviyakh* [Industry standard 39-195-86. Oil. Method for determination of oil displacement efficiency by water in laboratory conditions]. Moscow, Minneftproma Publ., 1986. 16 p.

Received: 5 February 2023.

Reviewed: 14 March 2023.

#### Information about the authors

**Andrey A. Sentemov**, post-graduate student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

**Mikhail B. Dorfman**, Cand. Sc., associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

УДК 628.4

## ПРОГНОЗ ВОСТРЕБОВАННОСТИ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ОБЪЕМОВ ВЫВОЗКИ ОТХОДОВ НА ОБЪЕКТЫ ОБРАЩЕНИЯ

Чилингер Лилия Наримановна<sup>1</sup>,  
lilichilinger@gmail.com

Латин Олег Вячеславович<sup>2</sup>,  
latin.ov@mail.ru

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

<sup>2</sup> Акционерное общество «Красноярское Аэрогеодезическое предприятие»,  
Россия, г. Красноярск, ул. Иртышская, 2а.

**Актуальность** исследования обусловлена анализом общей необходимости выделения земельных участков под строительство полигонов для захоронения твердых коммунальных отходов в будущем в контексте внедрения новой системы обращения с отходами в Российской Федерации, при которой объекты захоронения (полигоны захоронения твердых коммунальных отходов) не являются приоритетными.

**Цель** исследования заключается в определении ожидаемых результатов мероприятий, предпринятых в рамках новой системы обращения с отходами, в отношении объектов размещения и в расчёте общей площади земельного участка, которая должна быть сформирована для размещения объема твердых коммунальных отходов в 2024 г.

**Объекты:** объемы образования, вывозки и размещения твердых коммунальных отходов, площади земельных участков и численности населения.

**Методы.** Для прогнозирования объема используется метод статистического анализа колебаний временных рядов, его экстраполяция, расширение динамического диапазона с выравниванием по аналитической формуле, оценка погрешности метода и определение доверительных интервалов, аналитический и сравнительный анализ данных о предполагаемом вводе в эксплуатацию объектов по переработке твердых коммунальных отходов, математический расчет площади земельного участка с целью размещения определенного объема твердых коммунальных отходов.

**Результаты.** На основании прогноза образования отходов, ввода в эксплуатацию объектов инфраструктуры обращения с отходами до 2024 г. сделан вывод о перспективах востребованности земельных участков для организации полигонов. Объем твердых бытовых отходов увеличится и в 2024 г. рост может составить 5,46 % по сравнению с уровнем 2019 г. На основании анализа данных и информации об ожидаемом вводе объектов инфраструктуры предполагается, что к 2024 г. их относительная мощность должна быть перераспределена в пользу предприятий утилизации на 6,9 %. Несмотря на ожидаемое увеличение утилизации твердых отходов к 2024 г., прогнозируется увеличение мощности захоронения на 107,5 млн м<sup>3</sup>/год. Для ежегодного размещения дополнительных объемов твердых коммунальных отходов до 2024 г. государству необходимо выделить дополнительно 22171,9 га земель под организацию объектов захоронения.

### Ключевые слова:

Государственный отчет, информация, открытые данные, площадь земельного участка, локация, масса отходов, полигоны, объемы твердых коммунальных отходов, экстраполяция, прогноз, твердые коммунальные отходы, анализ, ввод в эксплуатацию, государственные программы.

### Введение

В современном мире подходы к решению проблем обращения с коммунальными и бытовыми отходами являются маркером достигнутого уровня развития стран и цивилизации в целом. Философия потребления генерирует товарное предложение, в котором само приобретение товаров является важнейшим видом человеческой деятельности. В процессе использования вещи постепенно теряют свои свойства, устаревают и в конечном счете оказываются в местах их сбора, накопления, обработки, утилизации, обезвреживания и размещения (захоронения). По данным совместного исследования международной группы ученых [1–5] в мире ежегодно образуется 2,01 млрд т твердых бытовых (коммунальных) отходов (ТКО) с прогнозом увеличения до 3,40 млрд т/год к 2050 г. Столь значительные цифры позволяют сделать вывод, что проблема обращения с твердыми коммунальными

отходами не является локальной или характерной для какого-то одного государства и его территории, а является новым вызовом глобального характера всему современному обществу [6].

Сегодня экологически чистые технологии обращения с отходами приобретают всё большую популярность. Озадаченные проблемой сохранения окружающей среды государства последовательно отказываются от практики захоронения отходов, вводя на своих территориях раздельный сбор, сортировку и утилизацию отходов.

На современном уровне развития технологий и цивилизации наиболее распространёнными являются три способа обращения с отходами: захоронение на полигонах, компостирование и утилизация на мусороперерабатывающих заводах с последующим сжиганием и получением электроэнергии [7]. Главным преимуществом захоронения на полигоне является

стоимость, которая в среднем в 2 раза ниже стоимости «сортировки или компостирования» [7]. Во многом именно по этой причине наиболее распространенным методом обращения с ТКО в Российской Федерации является их захоронение на полигонах [8].

В Российской Федерации для регулирования отношений в области обращения с отходами действует ФЗ [9], которым урегулированы правоотношения организации системы обращения и создания соответствующей инфраструктуры объектов обращения с ТКО.

Исследуя положения ФЗ [9], авторам стало известно, что главная цель существующего государственного регулирования – максимальное вовлечение отходов в переработку (утилизация). Данный вывод следует из ч. 2 ст. 3 ФЗ [9], где регламентирован приоритетный порядок в обращении с отходами, а именно с начала максимального использования исходных сырья и материалов и предотвращения образования отходов до обработки и утилизации отходов путем их сокращения и снижения класса опасности и обезвреживания [9]. Как мы видим, представленный в законе перечень направлений государственной политики является закрытым и строительство объектов размещения отходов (захоронения), которыми являются полигоны ТКО, не входят в него в качестве приоритетных государственных мероприятий.

Из различных источников известно, что площадь в РФ, занятая полигонами, увеличивается на 2,5–4 % ежегодно. Для нужд полигонов ТКО отчуждается около 10 тыс. га пригодных для использования земель [7]. В то же время некоторое количество земель занимают несанкционированные свалки, которые не имеют собственного учета и не входят в представленную статистику. Только по официальным данным [1] в 2019 г. в РФ до 131,3 тыс. га заняты полигонами отходов и свалками.

В Российской Федерации внедряется новая система обращения с отходами. Реализацией намеченных мероприятий планируется к 2030 г. достигнуть показателя снижения в два раза объема отходов, которые направляются на полигоны [10].

Для точного понимания сути происходящих изменений в сфере обращения с отходами, влияния этих изменений на состояние земельных ресурсов РФ необходимо выяснить – каким образом изменится площадь земель, занятая полигонами ТКО, в связи с внедрением новой системы обращения с отходами с учетом объективной тенденции роста количества ТКО [11].

Эволюция экономики и общества в современных условиях неразрывно связана с обеспечением её устойчивого развития. В этой связи подходы к решению проблем обращения с отходами, как правило, выражаются в необходимости взаимной увязки с целями устойчивого развития всех решений сферы управления и обеспечения жизнедеятельности общества различных уровней (локального, регионального и глобального) и иерархии территорий. Таким образом, увеличивается потребность не только в междисциплинарных исследованиях, но и в комплексных

межотраслевых подходах для разработки соответствующих решений [12]. Начальным элементом такого подхода может являться предметный анализ существующих данных официальной отчетности, в том числе данных государственного статистического наблюдения.

Настоящая работа представляет собой междисциплинарное исследование регионального уровня, проведенное на основе открытых данных [1–4] и данных о планируемом вводе в эксплуатацию инфраструктурных объектов обращения с отходами, содержащихся в государственных программах [13, 14].

Исследование опирается на действующие нормативные и методические документы в области защиты окружающей среды, природопользования и землеустройства [9, 10, 13–17]. В процессе исследования использованы общенаучные методы логического анализа, обобщения, сравнения, группировки, а также специальный метод прогнозирования возможных значений на основе статистического анализа колебаний динамического ряда для объемов вывозки ТКО.

По результатам выполненной работы получены прогнозные и ожидаемые значения:

- объемов вывозки ТКО на объекты инфраструктуры обращения с отходами на 2024 г.;
- объема и массы ТКО, образуемых человеком на территории Российской Федерации в год;
- параметров инфраструктуры объектов обращения с ТКО на 2024 г.;
- объема отходов, подлежащих размещению на полигонах ТКО в 2024 г.;
- площади земель, которые должны быть отведены под строительство объектов размещения ТКО в 2024 г.

Сделаны выводы о характере и достаточности планируемых мероприятий в области обращения с ТКО до 2024 г., а также ожидаемой востребованности земельных ресурсов и площадей территории РФ под отводимые полигоны ТКО.

#### Методы и материалы

Согласно данным Государственного доклада в Российской Федерации в период с 2010 по 2019 гг., количество отходов производства и потребления увеличилось на 69 млн м<sup>3</sup> (табл. 1) [3].

**Таблица 1.** Распределение по годам объема ТКО, вывозимых на объекты обработки, утилизации и размещения, млн м<sup>3</sup>

**Table 1.** Distribution by years of the volume of solid municipal waste (SMW) transported to facilities for treatment, utilization and disposal, million m<sup>3</sup>

Объемы вывозки ТКО от объектов образования по годам, данные Государственного доклада в млн м <sup>3</sup> Volumes of SMW removed from educational facilities by years, data from the State Report, million m <sup>3</sup>										
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
235,4	241,1	255,8	260,9	262,8	266,5	268,8	274,4	275,4	304,4	

Для построения прогноза и определения вероятных значений признака в будущем до 2024 г. используем метод статистического анализа колебаний дина-

мического ряда объемов вывозки ТКО на основе данных за 2010–2019 гг.

Выравнивание по аналитической формуле в настоящее время является наиболее распространенным способом экстраполяции рядов динамики, который отображает общую тенденцию изменения (рис. 1).

Путем построения гистограммы (столбчатой диаграммы) с добавлением линии тренда в программе «Excel» осуществляется подбор функции.

Полученная линейная функция  $y=5,948x+231,8$  описывает линию тренда в пределах представленного динамического ряда, отображающего тенденцию из-

менения объемов образуемых и вывозимых отходов в периоде с 2010 по 2019 гг. в зависимости от года наблюдения.

Линия тренда и коэффициент детерминации  $D=R^2$  (величина достоверности аппроксимации) также отображены на диаграмме для анализа уравнения на достоверность. Если коэффициент детерминации ( $R^2$ ) больше 0,70, такая функция может быть использована для анализа полученных материалов. Если данное условие не выполняется, то необходимо продолжить подбор построения линии тренда экспоненциальной, полиномиальной, логарифмической или степенной функциональной модели.

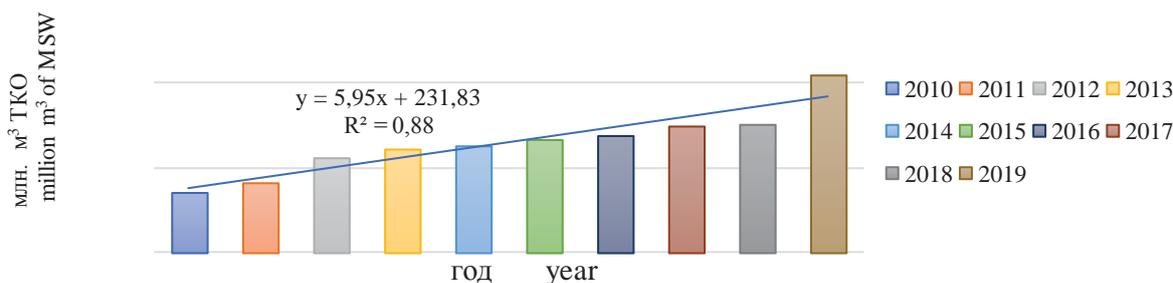


Рис. 1. Гистограмма распределения по годам объема ТКО, вывозимых на объекты обработки, утилизации и размещения, млн м<sup>3</sup>

Fig. 1. Histogram of distribution by years of the volume of SMW transported to processing, utilization and disposal facilities, million m<sup>3</sup>

Таблица 2. Расчёт оценки ошибки метода

Table 2. Calculation of method error estimate

Уровни динамического ряда Time series levels	Индекс года t Year index t	Фактическое значение, Yф Actual value, Yф	Теоретическое значение, Yт Theoretical value, Yт	Yф-Yт	(Yф-Yт) <sup>2</sup>	(t-tc) <sup>2</sup>
2010	1	235,4	237,7	-2,3	5,5	20,25
2011	2	241,1	243,7	-2,6	6,7	12,25
2012	3	255,8	249,6	6,2	37,9	6,25
2013	4	260,9	255,6	5,3	28,2	2,25
2014	5	262,8	261,5	1,3	1,6	0,25
2015	6	266,5	267,5	-1,0	1,0	0,25
2016	7	268,8	273,4	-4,6	21,5	2,25
2017	8	274,4	279,4	-5,0	24,8	6,25
2018	9	275,4	285,3	-9,9	98,6	12,25
2019	10	304,4	291,3	13,1	172,1	20,25
сумма total	55	2645,5	2645	25,9	397,9	82,5
среднее average	5,5	264,55	264,5	6,475	39,79	15

Примененная методика статистического прогноза основывается на анализе и экстраполяции (продлении) рядов динамики данных об отходах в прошедшем периоде и может быть осуществлена несколькими способами [18, 19]. Однако вне зависимости от выбранного способа суть метода заключается в предположении о том, что закономерности или тенденции изменения изучаемого объекта (явления) в прошлом сохраняются на определенном отрезке времени в будущем.

Срок, не превышающий 1/3 базисного периода, считается наиболее точным для прогноза методом экс-

траполяции [20]. Причем период прогнозирования не должен превышать базисный период. В этой связи для прогноза данным методом необходимо тщательное и детальное изучение длительных рядов динамики, что позволит выявить долгосрочную тенденцию изменения, причем в достаточно стабильных условиях. В нашем случае для исследования информация по объёму вывозки представлена за период с 2010 по 2019 гг., в этой связи относительно корректный прогноз может быть предоставлен на период не далее 2024 г.

В действительности допускается изменение тенденции развития, поэтому данные, полученные путем экстраполирования, необходимо рассматривать как вероятностные. Поэтому необходимо произвести оценку ошибки метода (табл. 2) и определить доверительные интервалы.

Для построения доверительного интервала прогноза последовательно, используя формулу (1), рассчитываем:

- величину (C), представляющую собой среднеквадратическое отклонение от линии тренда (стандартную ошибку)

$$C = \sqrt{\frac{\sum(Yф - Yт)^2}{n - p}} = \sqrt{\frac{398,0}{10 - 2}} = 7,05; \quad (1)$$

- коэффициент Стьюдента ( $G$ )= $(t_{ст-критическое})=1,86$  выбираем из табл. 2, для уровня значимости (доверительной вероятности)=(0,1), при числе степеней свободы для линейной модели из двух параметров  $(n-p)=(8)$ , или получаем через функцию Excel=СТЮДРАСПОБР (0,1;8)=1,86;
- границы доверительных интервалов ( $Yd$ ), для каждого года определяем из формул (2), (3):

- для нижней границы

$$Yd = Yt - M \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(t - tc)^2}{\sum_{i=1}^n (t - tc)^2}}; \quad (2)$$

- для верхней границы

$$Yd = Yt + M \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(t - tc)^2}{\sum_{i=1}^n (t - tc)^2}}. \quad (3)$$

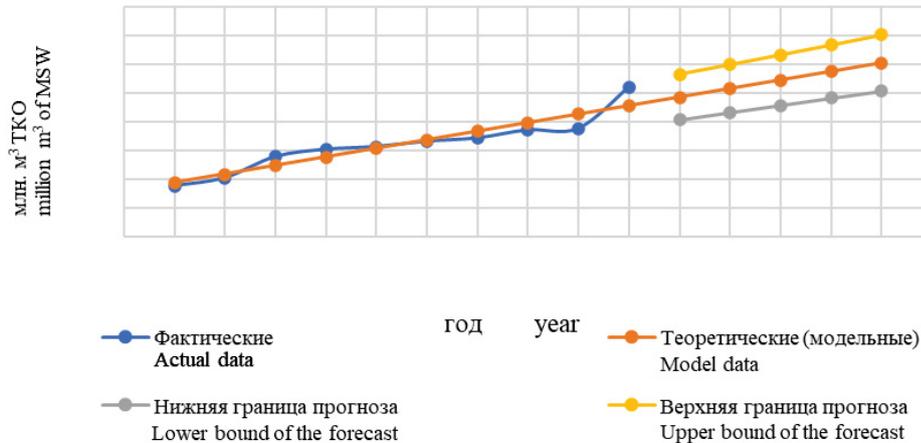
Подставляя в формулы и табл. 3 вычисленные значения, продолжим построение динамического ряда от индекса года ( $t$ ) и, таким образом, рассчитаем теоретические объёмы ( $Yt$ ) и доверительные интервалы ( $Yd$ ) для заданного значения доверительной вероятности (табл. 3).

Полученные данные модели и её доверительного интервала представим в виде точечной диаграммы (рис. 2).

**Таблица 3.** Прогноз объёмов вывозимых ТКО (млн м<sup>3</sup>) методом экстраполяции

**Table 3.** Forecast of the volumes of removed SMW (million m<sup>3</sup>) by the extrapolation method

Прогнозирование Forecasting	Индекс года Index of the year	Вид математической функции Type of mathematical function	Параметры Parameters	Фактический объём $Y_{ф}$ , м <sup>3</sup> Actual volume $Y_{ф}$ , m <sup>3</sup>	Теоретический объём, ( $Yt$ ) Theoretical volume, ( $Yt$ )	Коэффициент Стьюдента (G) Student's coefficient (G)	Оценка ошибки метода, (C) Method error estimate, (C)	Интервальная оценка, (M)(M=G*C) Interval assessment, (M)(M=G*C)	Доверительный интервал ( $Yd$ ) Confidence interval ( $Yd$ )	
									от	до
Год/Year										
2020	11	$Yt = A * x + B$	5,95 231,83	304,40	297,23	1,86	7,05	13,12	281,34	313,11
2021	12				303,18				286,52	319,83
2022	13				309,12				291,62	326,63
2023	14				315,07				296,64	333,51
2024	15				321,02				301,59	340,45



**Рис. 2.** Графическое отображение расчётных данных, млн м<sup>3</sup>

**Fig. 2.** Graphic display of calculated data, million m<sup>3</sup>

**Таблица 4.** Проверка значимости параметров модели

**Table 4.** Checking the significance of model parameters

$y = b_0 + b_1 * t$		
Параметр модели/Model parameter	$b_1$	$b_0$
Значения параметра/Parameter values	5,95	231,83
Ошибка определения параметра Parameter definition error	0,77	4,82
$t_{\text{расчетный}}$ = Значения параметра Ошибка определения параметра $t_{\text{calculated}}$ = Parameter values Parameter definition error	7,66	48,12

Размеры доверительного интервала зависят от ряда факторов: качества модели, значимости параметров, степени её близости к фактическим данным, числа наблюдений и уровня значимости.

Проведём проверку значимости параметров модели с использованием функции Excel =ЛИНЕЙН (табл. 4).

Гипотеза ( $H_0$ ) – если  $t_{\text{расчетный}}$  Критерий Стьюдента меньше или равен  $t_{\text{критическое}}$ , определенному через функцию Excel=СТЮДРАСПОБР, для уровня значимости (0,1), значит, параметр незначим и им можно пренебречь. Гипотеза ( $H_1$ ) – если  $t_{\text{расчетный}}$  Критерий Стьюдента больше  $t_{\text{критическое}}$ , значит, параметр значим.

В нашем случае оба полученных критерия оцениваемого параметра линейной модели  $t_{\text{расчетное}} = b_1 = 7,66$  и  $t_{\text{расчетное}} = b_0 = 48,12$  больше, чем  $t_{\text{критическое}} = 1,86$ . Следовательно, принимается альтернативная гипотеза ( $H_1$ ) и оба параметра являются значимыми, и можно

утверждать, что с доверительной вероятностью 0,1 в 2024 г. объём ТКО, вывозимых на объекты сортировки, утилизации и размещения, составит приблизительно 321,02 млн м<sup>3</sup> в доверительном интервале от 301,59 до 340,45.

Следующим элементом исследования являются данные Государственного доклада о существующей инфраструктуре объектов обращения на 2019 г., а также данные об ожидаемом вводе в эксплуатацию объектов обращения до 2024 г.

Согласно Государственному докладу [3], инфраструктура объектов обращения с отходами в 2020 г. в РФ была представлена объектами обработки, утилизации и размещения (табл. 5).

Полученные цифры (табл. 5) показывают, что мощность объектов утилизации в общей инфраструктуре объектов обращения с отходами уже в 2019 г. были способны утилизировать 124,5 млн м<sup>3</sup> ТКО. При этом фактическая утилизация ТКО в 2019 г. [3] составила 2,7 млн т, или 13,5 млн м<sup>3</sup>. Данных по захоронению ТКО в 2019 г. Государственный доклад [3] и сведения Росприроднадзора [2] не представляют.

**Таблица 6.** Распределение по объектам утилизации и размещения объемов вывозки ТКО за 2019 г.

**Table 6.** Distribution by disposal facilities and placement of volumes of SMW removal in 2019

Всего ТКО в 2019 г. Total SMW in 2019		%	Утилизировано фактически в год Actually disposed, per year		%	Мощность объектов размещения, в год Accommodation capacity, per year		%	Неустановленные объекты Unidentified objects		%
млн т million tons	61,1	100	млн т million tons	2,7	4,4	млн т million tons	46	75,3	млн т million tons	12,4	20,3
млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	304,4		млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	13,5		млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	230		млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	60,9	

**Таблица 7.** Прогноз инфраструктурных мощностей объектов обращения с отходами в 2024 г., количество в год по данным открытых источников

**Table 7.** Forecast of infrastructure capacities of waste management facilities in 2024, quantities per year according to open sources

Год Year	Объекты/Facilities of					
	обработки отходов waste treatment		утилизации отходов waste disposal		размещения отходов waste dumping	
2024	71,15	млн т million tons	48,89*	млн т million tons	67,5	млн т million tons
	355,7	млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	244,4	млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	337,5	млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>

\* – приведённая цифра получена из сложения данных Государственного доклада о планируемом вводе в эксплуатацию объектов утилизации и данных, полученных в [13] и предусматривающих ввод в эксплуатацию объектов энергетической утилизации в Московской области и г. Казани.

\* – the given figure was obtained from the addition of the data of the State Report on the planned commissioning of disposal facilities and data obtained [13] and operation of energy utilization facilities in the Moscow region and the city of Kazan.

Из анализа данных Государственного доклада [3] и федеральных государственных программ [13, 14] следует, что до 2024 г. (табл. 7) в основном силами федерального бюджета дополнительно к уже существующим мощностям должны быть введены в эксплуатацию объекты утилизации мощностью 225,2 млн м<sup>3</sup>/год.

Таким образом, если учесть приводимый за 2019 г. объём утилизации ТКО и мощность всех объектов размещения ТКО в 2019 г. (табл. 6) – 230 млн м<sup>3</sup>/год, становится понятно, что в 2019 г. не менее 20,3 %, или 60,9 млн м<sup>3</sup>/год, ТКО были вывезены на неустановленные объекты.

**Таблица 5.** Состояние инфраструктурных мощностей объектов обращения с отходами на 2019 г., количества в год (Государственный доклад за 2019 г.)

**Table 5.** State of infrastructure capacities of waste management facilities in 2019, quantities per year (State report for 2019)

Год Year	Объекты/Facilities of					
	обработки отходов waste treatment		утилизации отходов waste disposal		размещения отходов waste dumping	
2019	26,1	млн т million tons	24,9	млн т million tons	46,0	млн т million tons
	130,5	млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	124,5	млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>	230	млн м <sup>3</sup> million m <sup>3</sup>

За счёт бюджетов субъектов федерации и внебюджетных источников должны быть дополнительно введены в эксплуатацию мощности объектов размещения в общем объёме 107,5 млн м<sup>3</sup>/год.

Таким образом, совокупная мощность всех объектов обращения должна составить 581,9 млн м<sup>3</sup>/год без учета закрывающихся и ликвидируемых.

Учитывая представленные объёмы планируемых мероприятий по наращиванию мощностей на 107,5 млн м<sup>3</sup>/год объектов инфраструктуры обращения с отходами, можно рассчитать проектную площадь земель, которая подлежит отводу для размещения такого количества отходов и организации полигонов ТКО.

Согласно [15], проектирование, эксплуатация и рекультивация объектов размещения отходов организуется на срок не более 25 лет.

В соответствии с приложением 1 к инструкции 1996 г. [18] можно произвести расчёт площади полигона для средней высоты полигона 40 м.

Общую площадь (22171,9 га) земельного участка (S), которую необходимо отвести до 2024 г. под полигоны ТКО для наращивания мощности полигонов на 107,5 млн м<sup>3</sup>/год, можно рассчитать по формуле (4):

$$S = \left( 3 \cdot \frac{V_{\text{отх}} \cdot 100}{H} \right) \cdot 1,1 \cdot 25 = \left( 3 \cdot \frac{107,5 \cdot 100}{40} \right) \cdot 1,1 \cdot 25 = 22171,9 \text{ га}, \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий заложение внешних откосов 1:4;  $H$  – средняя высота полигона, равна 40 м;  $\beta_1$  – коэффициент, учитывающий полосу вокруг участка складирования;  $V_{\text{отх}}$  – ёмкость полигона 107,5 млн м<sup>3</sup>/год; 25 – двадцать пять лет предельный срок эксплуатации полигона.

Также можно определить общую достаточную площадь земель ( $S=69609,4$  га), которая должна быть занята действующими объектами размещения ТКО с совокупной мощностью 337,5 млн м<sup>3</sup>/год.

$$S = \left( 3 \cdot \frac{V_{\text{отх}} \cdot 100}{H} \right) \cdot 1,1 \cdot 25 = \\ = \left( 3 \cdot \frac{337,5 \cdot 100}{40} \right) \cdot 1,1 \cdot 25 = 69609,4.$$

Исходя из декларируемого государством отношения к объектам обработки как объектам «предварительной подготовки отходов к их дальнейшей утилизации» [9] и сопоставив сведения, размещенные на сайте Росприроднадзора [2] об образовании, ТКО за 2019 г. – 61,1 т – с данными (табл. 1) общего объёма вывозки в 2019 г. – 304,4 млн м<sup>3</sup>/год – из Государственного доклада [3], получим средний вес одного метра кубического ТКО – 0,2 т.

Сопоставив данные по численности населения РФ в 2019 г. – 146,8 млн человек [4], с общим объёмом вывозки 2019 г., можем определить средний объём образования ТКО на человека в год по территории Российской Федерации – 2,07 м<sup>3</sup>/человека в год. Полученные значения кажутся важными в связи с возможностью их применения для подтверждения данных настоящего исследования и сравнения с аналогичными показателями в других странах. Показатели также могут выполнять функцию ориентира для расчета ожидаемых объемов образования ТКО в региональных и муниципальных исследованиях.

Значение веса ТКО – 0,2 т/м<sup>3</sup> – и объёма – 2,07 м<sup>3</sup>/человека в год – характерно для территории Российской Федерации, и может отличаться в исследованиях по другим странам. Например, используемый учеными Атыравского университета, г. Атырав, (Казахстан), вес 1 м<sup>3</sup> ТКО составляет 0,3 т, а средний объём образования ТКО – 2,27 м<sup>3</sup>/человека в год [21]. Из данных, используемых в исследованиях ученых университета Удайна (Индонезия), объём ТКО, производимых каждым человеком в день, приблизительно равняется 3 л для больших городов и 2,5 л на человека в день для малых городов [22]. Из исследования международной группы ученых [5] в 2019 г. Европейский союз (ЕС) произвел в общей сложности 502 кг ТКО на душу населения. Весьма схожие данные образования ТКО на человека в год представлены в исследовании [23] в отношении отдельных стран Евросоюза: Бельгия – 409 кг; Болгария – 416 кг; Латвия – 438 кг; Венгрия – 385 кг.

#### Заключение

Важнейшая государственная функция, заключающаяся в обеспечении и гарантировании безопасности среды обитания, создании и поддержании благо-

приятных условий для сохранения жизни и здоровья человека, обеспечения его жизнедеятельности, должна быть определяющей при выборе площадок захоронения ТКО. Наиболее проблемными аспектами в области захоронения отходов являются относительная близость к урбанизированным территориям, а также значительные ограничения в эксплуатации в последующем данных земель после вывода из эксплуатации и рекультивации территории под такими объектами.

Для реализации намеченных целей в области обращения с ТКО в РФ приняты федеральные государственные программы, предусматривающие ввод в эксплуатацию инфраструктурных объектов обращения с отходами [13, 14].

Все вышеприведенные нормативные источники и планируемые федеральные мероприятия не предполагают разработку и финансирование вплоть до 2024 г. каких-то специальных мероприятий в области территориального планирования, проектирования строительства объектов размещения отходов. По сути, федеральный регулятор оставляет за рамками своего участия ТКО, направляемые для захоронения на объекты размещения.

Между тем полученные цифры позволяют утверждать, что до 2024 г. практика размещения отходов на полигонах будет продолжена. Инфраструктура объектов обращения будет расширяться, в том числе и за счёт строительства полигонов ТКО.

С учётом проанализированного материала и полученных данных можно сделать следующие выводы:

- при существующей тенденции объём ТКО будет увеличиваться, в 2024 г. он может составить в среднем 321,02 млн м<sup>3</sup> (доверительный интервал от 301,59 до 340,45 млн м<sup>3</sup>), что составляет прирост 5,46 % к уровню 2019 г.;
- существующая инфраструктура обращения с отходами 2019 г. выглядит следующим образом: 35,1 % – объекты утилизации и 64,9 % – полигоны ТКО;
- прогнозируемая инфраструктура обращения с отходами в 2024 г. должна выглядеть следующим образом: 42 % – объекты утилизации и 58 % – полигоны ТКО;
- в период с 2019 по 2024 гг. структура объектов обращения с отходами изменится незначительно, предполагается перераспределение относительной мощности в пользу утилизации на 6,9 %;
- по состоянию на 2019 г. при общем объёме вывозки отходов ТКО в 304,4 млн м<sup>3</sup> дефицит объектов инфраструктуры отсутствует. Между тем инфраструктура утилизации, рассчитанная на 124,5 млн м<sup>3</sup>, используется для утилизации 13,5 млн м<sup>3</sup>, что составляет 10,8 % от её годовой мощности;
- для достижения программных целей по наращиванию на 107,5 млн м<sup>3</sup>/год объёмов размещения отходов на полигонах ТКО к 2024 г. государство должно выделить дополнительно 22171,9 гектаров земель под организацию объектов размещения ТКО;

- кроме категории утилизации и захоронения выявлена категория объектов, на которые в 2019 г. вывезено 20,3 %, или 60,9 млн м<sup>3</sup>, ТКО. Предположительно, данную категорию могут представлять объекты, не отвечающие обязательным требованиям и не включенные в Государственный реестр объектов размещения отходов [18], но продолжающие принимать отходы.

В рамках новой системы обращения с отходами запланированные к реализации мероприятия по наращиванию мощностей объектов размещения к 2024 г. приведут к увеличению площадей, занимаемых полигонами ТКО.

В этой связи следует ожидать, что востребованность в геoinформационном обеспечении деятельности по территориальному планированию, землеустройству, поиску, выбору мест и земельных участков для «обоснования предлагаемых геопространственных решений» [24] размещения полигонов ТКО к 2024 г. будет возрастать. В ближайшие годы полигоны ТКО, как объекты размещения, по-прежнему остаются востребованными объектами обращения с отходами.

Исходя из понимания перспектив дальнейшего строительства полигонов ТКО, продолжительного характера работы данных объектов и их относительной приуроченности к урбанизированным территориям, следует уделить внимание разработке методики

определения перспективных территорий для размещения таких объектов на основе принципов «рационального использования природных ресурсов» и их взаимосвязи с природными экосистемами [25]. Знание и учет природных факторов и экологической обстановки территории являются ключевыми факторами при выборе рационального направления использования земель, прогнозе дальнейшего развития территории, а также обеспечении экологической безопасности [26].

Учитывая, что ТКО, как сыпучие материалы, достаточно сложно поддаются точному учету [27], требуется разработка собственной согласованной методологии учёта образования, вывозки [28], контроля объёмов ТКО на полигонах на основе современных геопространственных решений сочетания геодезического и фотограмметрического методов [29–31].

Настоящее исследование представляет собой обобщённый анализ, основанный на открытых данных официальной отчетности государственных органов власти РФ. Исследование описывает положения дел в отрасли обращения с отходами и помогает сформировать представление о направлении государственного регулирования, прогнозе объёмов образования ТКО и необходимой площади земель для их размещения. Исследование может быть использовано при принятии решений в рамках реализации новой системы обращения с отходами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии Российской Федерации. URL: <https://rosreestr.gov.ru/site/activity/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/> (дата обращения 01.04.2023).
2. Сведения об образовании, обработке, утилизации отходов производства и потребления за 2019 год, представленные региональными операторами, осуществляющими деятельность с твердыми коммунальными отходами 2 ТП (отходы) за 2019 год файл XLSX 14,57 Kb. URL: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/help/> (дата обращения 01.04.2023).
3. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://www.mnr.gov.ru/> (дата обращения 01.04.2023).
4. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (дата обращения 01.04.2023).
5. Predictive analysis of municipal solid waste generation using an optimized neural network model / N. Elshaboury, M.E. Abdelkader, A. Al-Sakkaf, G. Alfalah // *Processes*. – 2021. – V. 9. – № 2045. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9112045> (дата обращения 01.04.2023).
6. Kolekar K.A., Hazrab T., Chakrabarty S.N. Review on prediction of municipal solid waste generation models // *Procedia Environmental Sciences*. – 2016. – № 35. – P. 238–244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.087> (дата обращения 01.04.2023).
7. Курбатова А.И., Харламова М.Д. Твердые отходы: технологии утилизации, методы контроля, мониторинг. 1-е изд. – М.: Издво «Юрайт», 2017. – 231 с.
8. Sereda T. Study of the morphological composition of municipal solid waste in the Perm region // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – № 677. 042080. URL: [https://www.researchgate.net/publication/350080257\\_Study\\_of\\_the\\_morphological\\_composition\\_of\\_municipal\\_solid\\_waste\\_in\\_the\\_Perm\\_region](https://www.researchgate.net/publication/350080257_Study_of_the_morphological_composition_of_municipal_solid_waste_in_the_Perm_region) (дата обращения 01.04.2023).
9. Об отходах производства и потребления. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ. С изменениями на 07.04.2020 г. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/) (дата обращения 01.04.2023).
10. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года. Указ Президента РФ 21.07.2020 № 474. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_357927/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357927/) (дата обращения 01.04.2023).
11. Glushkov D., Kuznetsov G., Paushkina K. Switching coal-fired thermal power plant to composite fuel for recovering industrial and municipal waste: combustion characteristics, emissions, and economic effect // *Energies*. – 2020. – V. 13. – № 259. – 042080. URL: <https://doi.org/10.3390/en13010259> (дата обращения 01.04.2023).
12. Карпик А.П. Современное состояние и проблемы геoinформационного обеспечения территорий // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2012. – № 2. – С. 3–8.
13. Снижение негативного воздействия на окружающую среду посредством ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде и снижения доли захоронения твердых коммунальных отходов. Паспорт приоритетного проекта, утв. президентом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и приоритетным проектам, протокол от 21.12.2016 № 12. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_216317/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216317/) (дата обращения 01.04.2023).
14. Экология. Паспорт национального проекта, утв. президентом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 № 16. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_316096/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_316096/) (дата обращения 01.04.2023).
15. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектное задание, эксплуатация и рекультивация. Свод правил СП 320.1325800.2017, утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 17.11.2017 № 1555/п. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=21871#G2Q9gzS7MDZbjWVU> (дата обращения 01.04.2023).
16. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. Утв. Минстром России 02.11.1996. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_146721/03a2be231a770df1c965eed2cf7664b6d4b50e3/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146721/03a2be231a770df1c965eed2cf7664b6d4b50e3/) (дата обращения 01.04.2023).

17. Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов. Приказ Минприроды России от 30.09.2011 № 792. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_121841/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121841/) (дата обращения 01.04.2023).
18. Cubillos M. Multi-site household waste generation forecasting using a deep learning approach // *Waste Management*. – 2020. – V. 115. – P. 8–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.046> (дата обращения 01.04.2023).
19. Atul K., Samadder S.R. An empirical model for prediction of household solid waste generation rate – a case study of Dhanbad, India // *Waste Management*. – 2017. – V. 68. – P. 3–15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.034> (дата обращения 01.04.2023).
20. Шалдунова Н.П., Денисова Н.С., Кирик Д.А. Математическая обработка земельно-кадастровой информации. – Пермь: М-во с.-х. РФ, ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2015. – 73 с.
21. Forecast of solid waste generation in Atyrau region / M.S. Yessenamanova, R. Salykhov, A.E. Tlepbergenova, Zh.S. Yessenamanova, N.R. Tauova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – № 1889. – 032010. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032010.
22. Sudiarta G. A. W., Suyasa I. W. B. Analysis of land requirements of Temesi final disposal facility, Gianyar Regency with 3R waste management scenario // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – № 623. – 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/623/1/012001.
23. Osazee I. Landfill in a sustainable waste disposal // *Terra Nova*. – 2021. – № 2 (4). – P. 67–74. DOI: 10.24018/ejgeo.2021.2.4.165.
24. Карпик А.П. Перспективы развития геодезического и картографического производства и новая парадигма геопространственной деятельности // *Вестник СГУГиТ*. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 19–29.
25. Жарников В.Б. Экологическая концепция рационального землепользования // *Гео-Сибирь*. – 2008. – Т. 2. – № 1. – С. 163–175.
26. Pasechnik E. Yu., Chilinger L. N. Development of the methods of environmental and sanitary-hygienic assessment of urbanized lands (on the example of the Ob-Tom interfluvium) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 350. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012041.
27. Сравнение точности определения объемов сыпучих материалов по данным съемки с беспилотных летательных аппаратов и геодезическим измерениям / А.В. Комиссаров, Е.И. Аврунев, Х.К. Ямбаев, Е.П. Хлебникова // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24. – № 4. – С. 70–77.
28. Kłojzy-Karczmarczyk B., Makoud S. Analysis of municipal waste generation rate in Poland compared to selected European countries // *Web of Conferences*. – 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171902025.
29. Drone technology in municipal solid waste management and landfilling: a comprehensive review / N. Sliusar, T. Filkin, M. Huber-Humer, M. Ritzkowski // *Waste Management*. – 2022. – V. 139. – P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.006> (дата обращения 01.04.2023).
30. Caio César de Sousa Mello, Daniel Henrique Carneiro Salim, Gustavo Ferreira Simões. UAV-based landfill operation monitoring: a year of volume and topographic measurements // *Waste Management*. – 2022. – V. 137. – P. 253–263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.020> (дата обращения 01.04.2023).
31. Unmanned aerial vehicles for operational monitoring of landfills / T. Filkin, N. Sliusar, M. Ritzkowski, M. Huber-Humer // *Journal of Drones*. – 2021. – V. 5. – № 4. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/5/4/125> (дата обращения 01.04.2023).

Поступила: 12.04.2022 г.

Прошла рецензирование: 13.05.2023 г.

#### Информация об авторах

**Чилингер Л.Н.**, кандидат технических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Латин О.В.**, инженер отдела полевого производства Акционерного общества «Красноярское Аэрогеодезическое предприятие».

UDC 628.4

## FORECAST OF THE DEMAND OF SOLID MUNICIPAL WASTE POLYGONS BASED ON THE ANALYSIS OF OPEN DATA OF COMMISSIONING AND VOLUME OF WASTE REMOVAL TO DISPOSAL FACILITIES

Liliya N. Chilinger<sup>1</sup>,  
lilichilinger@gmail.com

Oleg V. Latin<sup>2</sup>,  
latin.ov@mail.ru

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

<sup>2</sup> Joint Stock Company «Krasnoyarsk Aerogeodetic Enterprise»,  
2a, Irtyshskaya street, Krasnoyarsk, 660056, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the study of the general need to allocate land plots for organization of solid municipal waste polygons in the future in the context of the new waste management system being introduced in the Russian Federation, in which waste disposal facilities (solid municipal waste polygons) are not a priority.

**The main aim** is to determine the expected results of the measures taken within the framework of the new waste management system in relation to accommodation facilities and to calculate the total area of the land plot that should be formed to accommodate the volume of solid municipal waste in 2024.

**Objects:** volumes of formation, removal and closure of closed municipal waste, land area and population.

**Methods.** To predict the amount of training, the method of statistical analysis of fluctuations in time series, its extrapolation, expansion of the dynamic range with alignment according to the analytical formula, estimation of the method error and determination of confidence intervals are used. The essence of the method lies in the assumption that the patterns or tendencies of change of the studied object (phenomenon) in the past will persist for a certain period of time in the future. Analytical and comparative analysis of data on the proposed commissioning of facilities for the processing solid municipal waste; mathematical calculation of the area of a land plot for placing a certain volume of solid municipal waste were applied in the paper.

**Results.** Based on the forecast of waste formation, commissioning of waste management infrastructure facilities until 2024, conclusions are drawn about the prospects for the demand for land plots for organizing polygons. The volume of municipal solid waste will increase and in 2024 may grow by 5,46 % compared to the level of 2019. Based on the analysis of data and information on the expected commissioning of infrastructure facilities, it is assumed that by 2024 their relative capacity will be redistributed in favor of utilization enterprises by 6,9 %. Despite the expected increase in the disposal of solid waste by 2024, an increase in the disposal capacity is projected by 107,5 million m<sup>3</sup>/year. For the annual placement of additional volumes of solid municipal waste until 2024, the state must allocate an additional 22171,9 hectares of land for organizing disposal facilities.

### Key words:

State report, information, open data, land plot, locations, waste mass, polygons, solid municipal waste volumes, extrapolation, forecast, solid municipal waste, analysis, commissioning, government programs.

### REFERENCES

1. *Ofitsialny sayt Federalnoy sluzhby gosudarstvennoy registratsii kadastra i kartografii Rossiyskoy Federatsii* [Official website of the Federal Service for State Registration of Cadastre and Cartography of the Russian Federation]. Available at: <https://rosreestr.gov.ru/site/activity/gosudarstvenny-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/> (accessed 1 April 2023).
2. *Svedeniya ob obrazovanii, obrabotke, utilizatsii otkhodov proizvodstva i potrebleniya za 2019 god, predstavlenyye regionalnymi operatorami, osushchestvlyayushchimi deyatelnost s tverdymi kommunalnymi otkhodami 2 TP (otkhody) za 2019 god, fayl XLSX 14,57 Kb* [Information on the generation, processing, disposal of production and consumption waste for 2019, provided by regional operators operating with municipal solid waste 2 TP (waste) for 2019, XLSX file 14.57 Kb]. Available at: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/help/> (accessed 1 April 2023).
3. *Ofitsialny sayt Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii* [Official website of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation]. Available at: <https://www.mnr.gov.ru/> (accessed 1 April 2023).
4. *Ofitsialny sayt Federalnoy sluzhby gosudarstvennoy statistiki Rossiyskoy Federatsii* [Official website of the Federal State Statistics Service of the Russian Federation]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (accessed 1 April 2023).
5. Elshaboury N., Mohammed Abdelkader E., Al-Sakkaf A., Alfalah G. Predictive analysis of municipal solid waste generation using an optimized neural network model. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 2045. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr9112045> (accessed 1 April 2023).
6. Kolekar K. A., Hazrab T., Chakrabarty S. N. A review on prediction of municipal solid waste generation models. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, no. 35, pp. 238–244. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.087> (accessed 1 April 2023).
7. Kurbatova A.I., Kharlamova M.D. *Tverdye otkhody: tekhnologii utilizatsii, metody kontrolya, monitoring* [Solid waste: disposal technologies, control methods, monitoring]. 1<sup>st</sup> ed. Moscow, Yurayt Publ. House, 2017. 231 p.
8. Sereda T. Study of the morphological composition of municipal solid waste in the Perm region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, no. 677, 042080. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/350080257\\_Study\\_of\\_the\\_morphological\\_composition\\_of\\_municipal\\_solid\\_waste\\_in\\_the\\_Perm\\_region](https://www.researchgate.net/publication/350080257_Study_of_the_morphological_composition_of_municipal_solid_waste_in_the_Perm_region) (accessed 1 April 2023).
9. *Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya. Federalny zakon ot 24.06.1998 № 89-FZ c izmeneniyami na 07.04.2020* [On production and consumption waste. Federal Law of June 24, 1998, No. 89-FZ as amended on April 7, 2020]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/) (accessed 1 April 2023).

10. *O natsionalnykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda. Ukaz Prezidenta RF 21.07.2020 № 474* [On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030. Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 No. 474]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_357927/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357927/) (accessed 1 April 2023).
11. Glushkov D., Kuznetsov G., Paushkina K. Switching coal-fired thermal power plant to composite fuel for recovering industrial and municipal waste: combustion characteristics, emissions, and economic effect. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 259, 042080. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13010259> (accessed 1 April 2023).
12. Karpik A.P. Sovremennoe sostoyanie i problemy geoinformatsionno obespecheniya territoriy [Current state and problems of geoinformation support of territories]. *Interesko Geo-Sibir*, 2012, no. 2, pp. 3–8.
13. *Snizhenie negativnogo vozdevstviya na okruzhavushchuyu sredyu posredstvom likvidatsii obektov nakoplennoego vreda okruzhavushchey srede i snizheniya doli zakhoroneniya tverdykh kommunalnykh otkhodov. Paspport prioritetnogo proekta, utv. prezidiumom Soveta pri Prezidente RF po strategicheskomu razvitiyu i prioritetnym proektam, protokol ot 21.12.2016 № 12* [Reducing the negative impact on the environment through the elimination of objects of accumulated environmental damage and reducing the share of municipal solid waste disposal. Passport of the priority project, approved. Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and Priority Projects, dated December 21, 2016 Minutes No. 12]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_216317/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216317/) (accessed 1 April 2023).
14. *Ekologiya. Paspport natsionalnogo proekta, utv. prezidiumom Soveta pri Prezidente RF po strategicheskomu razvitiyu i natsionalnym proektam, protokol ot 24.12.2018 № 16* [Ecology. Passport of the national project, approved. Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects, dated December 24, 2018 protocol No. 16]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_316096/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_316096/) (accessed 1 April 2023).
15. *Poligony dlya tverdykh kommunalnykh otkhodov. Proektirovaniye, ekspluatatsiya i rekultivatsiya. Svod pravil SP 320.1325800.2017, utv. prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishhno-kommunalnogo khozaystva RF ot 17.11.2017 № 1555/pr* [Landfills for municipal solid waste. Design, operation and reclamation. Code of rules SP 320.1325800.2017, approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. pr dated November 17, 2017 No. 1555]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=21871#G2Q9gzS7MDZbjWVU> (accessed 1 April 2023).
16. *Instruktsiya po proektirovaniyu, ekspluatatsii i rekultivatsii poligonov dlya tverdykh bytovykh otkhodov. Utv. Minstroem Rossii 02.11.1996* [Instructions for the design, operation and reclamation of landfills for municipal solid waste. Approved by the Ministry of Construction of Russia 02.11.1996]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_146721/03a2be231a770dffc965eed2cf766d4b6d4b50e3/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146721/03a2be231a770dffc965eed2cf766d4b6d4b50e3/) (accessed 1 April 2023).
17. *Ob utverzhdenii Poryadka vedeniya gosudarstvennogo kadastra otkhodov. Prikaz Minprirody Rossii ot 30.09.2011 № 792* [On approval of the procedure for maintaining the state cadastre of waste. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 792 dated September 30, 2011]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_121841/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121841/) (accessed 1 April 2023).
18. Cubillos M. Multi-site household waste generation forecasting using a deep learning approach. *Waste Management*, 2020, vol. 115, pp. 8–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.046> (accessed 1 April 2023).
19. Atul K., Samadder S.R., An empirical model for prediction of household solid waste generation rate – a case study of Dhanbad, India. *Waste Management*, 2017, vol. 68, pp. 3–15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.034> (accessed 1 April 2023).
20. SHaldunova N.P., Denisova N.S., Kirik D.A., *Matematicheskaya obrabotka zemelno-kadastrvoy informatsii* [Mathematical processing of land cadastral information]. Perm, Perm State Agricultural Academy Publ., 2015. 73 p.
21. Yessenamanova M.S., Salykhov R., Tlepbergenova A.E., Yessenamanova Zh.S., Tauova N.R. Forecast of solid waste generation in Atyrau region. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1889, 032010. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032010.
22. Sudiartha G.A.W., Suyasa I.W.B. Analysis of land requirements of Temesi final disposal facility, Gianyar Regency with 3R waste management scenario. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, no. 623, 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/623/1/012001.
23. Osazee I. Landfill in a sustainable waste disposal. *Terra Nova*, 2021, no. 2 (4), pp. 67–74. DOI: 10.24018/ejgeo.2021.2.4.165.
24. Karpik A.P. Perspektivy razvitiya geodezicheskogo i kartograficheskogo proizvodstva i novaya paradigma geoprostranstvennoy deyatelnosti [Prospects for the development of geodetic and cartographic production and a new paradigm of geospatial activity]. *Vestnik SGUGiT*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 19–29.
25. Zharnikov V.B. Ekologicheskaya kontseptsiya ratsionalnogo zemlepolzovaniya [Ecological concept of sustainable land use]. *Geo-Sibir*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 163–175.
26. Pasechnik E.Yu., Chilinger L.N. Development of the methods of environmental and sanitary-hygienic assessment of urbanized lands (on the example of the Ob-Tom interfluvium). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 350. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012041.
27. Komissarov A.V., Avrunev E.I., Yambaev H.K., Hlebnikova E.P. Svravnenie tochnosti opredeleniya obemov sypuchikh materialov po dannym semki s bespilotnykh letatelnykh apparatov i geodezicheskimi izmereniyami [Comparison of the accuracy of determining the volumes of bulk materials according to survey data from unmanned aerial vehicles and geodetic measurements]. *Vestnik SGUGiT*, 2019, vol. 24, no. 4, pp. 70–77.
28. Kloyzy-Karczmarczyk B., Makoud S. Analysis of municipal waste generation rate in Poland compared to selected European countries. *Web of Conferences*, 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171902025.
29. Sliusar N., Filkin T., Huber-Humer M., Ritzkowski M., Drone technology in municipal solid waste management and landfilling: a comprehensive review. *Waste Management*, 2022, vol. 139, pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.006> (accessed 1 April 2023).
30. Caio César de Sousa Mello, Daniel Henrique Cameiro Salim, Gustavo Ferreira Simões. UAV-based landfill operation monitoring: a year of volume and topographic measurements. *Waste Management*, 2022, vol. 137, pp. 253–263. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.020> (accessed 1 April 2023).
31. Filkin T., Sliusar N., Ritzkowski M., Huber-Humer M. Unmanned Aerial Vehicles for Operational Monitoring of Landfills. *Journal Drones*, 2021, vol. 5, no. 4. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/5/4/125> (accessed 1 April 2023).

Received: 12 April 2022.

Reviewed: 13 May 2023.

#### Information about the authors

**Liliya N. Chilinger**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Oleg V. Latin**, engineer, Joint Stock Company «Krasnoyarsk Aero-geodetic Enterprise».

УДК 339.13:669.27:669.018.25

## ОБЗОР МИРОВОГО РЫНКА ВОЛЬФРАМА. ЧАСТЬ 3. ТОВАРНЫЕ ПОТОКИ КОНЕЧНЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ ПРОДУКТОВ

Боярко Григорий Юрьевич<sup>1</sup>,  
gub@tpu.ru

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

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью изучения проблем весьма изменчивого мирового рынка конечных вольфрамовых продуктов.

**Цель:** изучение динамики мировых товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) конечных вольфрамовых продуктов (ферровольфрама, вольфрама металлического, карбида вольфрама); оценка критичности мирового рынка конечных вольфрамовых продуктов.

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

**Результаты.** Мировой рынок конечных вольфрамовых продуктов достаточно сложный. Мировое производство конечных вольфрамовых продуктов выросло с 42–52 тыс. т/год в 1970-х гг. до 100–119 тыс. т/год в 1910-х гг. с темпом прироста за 50-летний период +2,2%/год. В 1970–1980-е гг. был период обычного состояния медленно растущего мирового потребления конечных вольфрамовых продуктов с темпами прироста спроса на них +1,9%/год. В 1990-е гг. – значительное сокращение спроса на конечные вольфрамовые продукты (–4,9%/год) в военной сфере (завершение холодной войны) и сокращение роли России на вольфрамовом рынке (последствия стагнации российской экономики, в первую очередь, металлообработки). В 2000–2010-е гг. – бурный рост мирового спроса на конечные вольфрамовые товарные продукты, в первую очередь карбида вольфрама, ввиду экспоненциального наращивания возможностей китайской промышленности. Темпы прироста мирового спроса на конечные вольфрамовые продукты в этот период составили +6,7%/год. Китай доминирует в мировом производстве, потреблении и торговле конечными вольфрамовыми продуктами, поэтому его торговая политика по сдерживанию (квотированию) экспорта этих товаров задает динамику мирового рынка вольфрама. К 2020 г. лидером производства конечных вольфрамовых продуктов является Китай: 68 % мирового предложения ферровольфрама, 57 % вольфрама металлического и 75 % карбида вольфрама. Большая часть этих товарных продуктов остается в Китае и идет на национальное потребление: 69 % мирового спроса на ферровольфрам, 53 % вольфрам металлический и 55% карбид вольфрама. Начиная с 1990 г. рынок мировой торговли вольфрамовыми продуктами перестает быть сырьевым, в нем начинают преобладать конечные вольфрамовые товары. Доли стоимости конечных вольфрамовых продуктов в мировой торговле суммы всех вольфрамовых продуктов составляли 20–30 % в 1970–1980-е гг., начали увеличиваться в 1989 г. превысив 50 % в 1993 г. и колеблется в диапазоне 45–65 % в 2000–2010-е гг. Главными экспортёрами к настоящему времени являются: для ферровольфрама – Китай, для вольфрама металлического – Китай, США и Германия, для карбида вольфрама – Китай. Главные импортёры: для ферровольфрама – Германия, Япония, Нидерланды и Австрия, для вольфрама металлического – Германия и США, для карбида вольфрама – Германия, Япония и США. Большая часть промышленно развитых стран – потребители конечных вольфрамовых продуктов: США, страны Европейского Союза и Япония стали зависимыми от импорта вольфрамовых продуктов и будут продолжать оставаться таковыми в обозримом будущем.

**Ключевые слова:**

Ферровольфрам, вольфрам металлический, карбид вольфрама, производство, экспорт, импорт, потребление, ценообразование.

### Введение

Мировое предложение вольфрамовых продуктов отличается сложностью рыночных отношений, обусловленной доминированием предложения из одной страны (Китай), множеством стран-импортёров и значительными динамическими изменениями объемов спроса и предложения товарных вольфрамовых продуктов за последние 50 лет [1–4]. В 1990-е гг. произошло резкое сокращение спроса на вольфрамовые продукты в военной сфере, уменьшилась роль России на вольфрамовом рынке на фоне стагнации российской экономики [5]. В 2000–2010-е гг. происходил бурный рост мирового спроса и предложения вольфрамовых товарных продуктов ввиду экспоненциального наращивания возможностей китайской промышленности [6–8]. Необходимо оценить состояние мирового производства вольфрама, произвести анализ динамики мирового рынка множественности товарных сырьевых вольфрамовых продуктов (ферровольфрама, вольфрама металлического и карбида воль-

фрама) и определить уровень критичности сырьевых вольфрамовых товаров с позиции их спроса и предложения.

### Методы исследования

С целью изучения мирового рынка конечных вольфрамовых продуктов были обработаны данные по их мировому производству, экспорту и импорту (в метрических тоннах) за период наиболее полных данных 1970–2020 гг., а также по динамике мировых цен на эти продукты (в USD за метрическую тонну). Для показателей объемов производства, импорта и экспорта за базовый вариант брались данные Британской геологической службы [9], имеющиеся для всего изучаемого периода. Они сравнивались с данными Геологической службы США (USGS) [10], маркетинговых компании TrendEconomy [11] и ИнфоМайн [12], информационной службы ООН (UN) [13], а также другими национальными источниками, включая доклады Федерального агентства недропользования [14]

и Федеральной таможенной службы [15] России. При наличии различий с данными BGS в своде данных выставлялись сведения национальных источников или данные, присутствующие минимум в двух источниках (TrendEconomy, UN, USGS или ИнфоМайн). Нетто-потребление конечных вольфрамовых продуктов рассчитывалось по сведению баланса «Производство» + «Импорт» – «Экспорт» = «Нетто-потребление».

#### Товарные потоки вольфрамовых продуктов

Конечными товарными вольфрамовыми продуктами, выпускаемыми вольфрамовой отраслью, являются: ферровольфрам, вольфрам металлический и карбид вольфрама.

Ферровольфрам используется для производства специализированных сплавов стали (конструкционных, тяжелонагруженных, жаропрочных) путем их легирования. Производится ферровольфрам простой выплавкой из вольфрамитового и шеелитового концентратов или металлургической плавкой с добавкой алюминия [16–18].

Мировое предложение ферровольфрама возрастало с 9,4 тыс. т в 1970 г. до 16,3 тыс. т в 2017 г. (+1,2 %/год) (рис. 1, а). Ферровольфрам выпускается лишь в отдельных странах мира. В целом изменения в

динамике объемов предложения ферровольфрама определяются доминированием китайского производства, увеличившего свою долю мирового предложения этого продукта с 10 % (1 тыс. т) в 1970 г. до 94 % (10,5 тыс. т) к 2004 г., но в дальнейшем, несмотря на рост его выпуска до 11,5 тыс. т в 2017 г., доля китайского производства снизилась до 70 %. Производство ферровольфрама в СССР, составлявшее в 1970–1980-е годы 3–4 тыс. т/год (33–47 % от мирового предложения), начиная с 1992 г. в России начало сокращаться: 1,3–3,0 тыс. т/год (14–32 %) в 1990-е гг., 0,5–0,7 тыс. т/год (4–5 %) в 2000-е гг., но в 2010-е гг. намечился рост до 1,0–3,0 тыс. т/год (7–20 %). Британия, в 1970-е гг. выпускавшая ферровольфрам в значительных количествах – 3,0–3,5 тыс. т/год (27–32 % от мирового предложения), в 1980-е гг. снизившая выпуск до 1 тыс. т/год, в 1989 г. прекратила производство этого товарного продукта. Начиная с 2009 г. организовано производство ферровольфрама во Вьетнаме – до 2,8 тыс. т/год (до 21 % мирового предложения), но с 2018 г. его выпуск упал до 0,2–0,6 тыс. т/год (2–4 %). Ферровольфрам производится также в США (до 0,9 тыс. т/год), Швеции (до 0,9 тыс. т/год), Японии (до 0,5 тыс. т/год), Португалии (до 0,4 тыс. т/год), Индии (до 0,3 тыс. т/год).

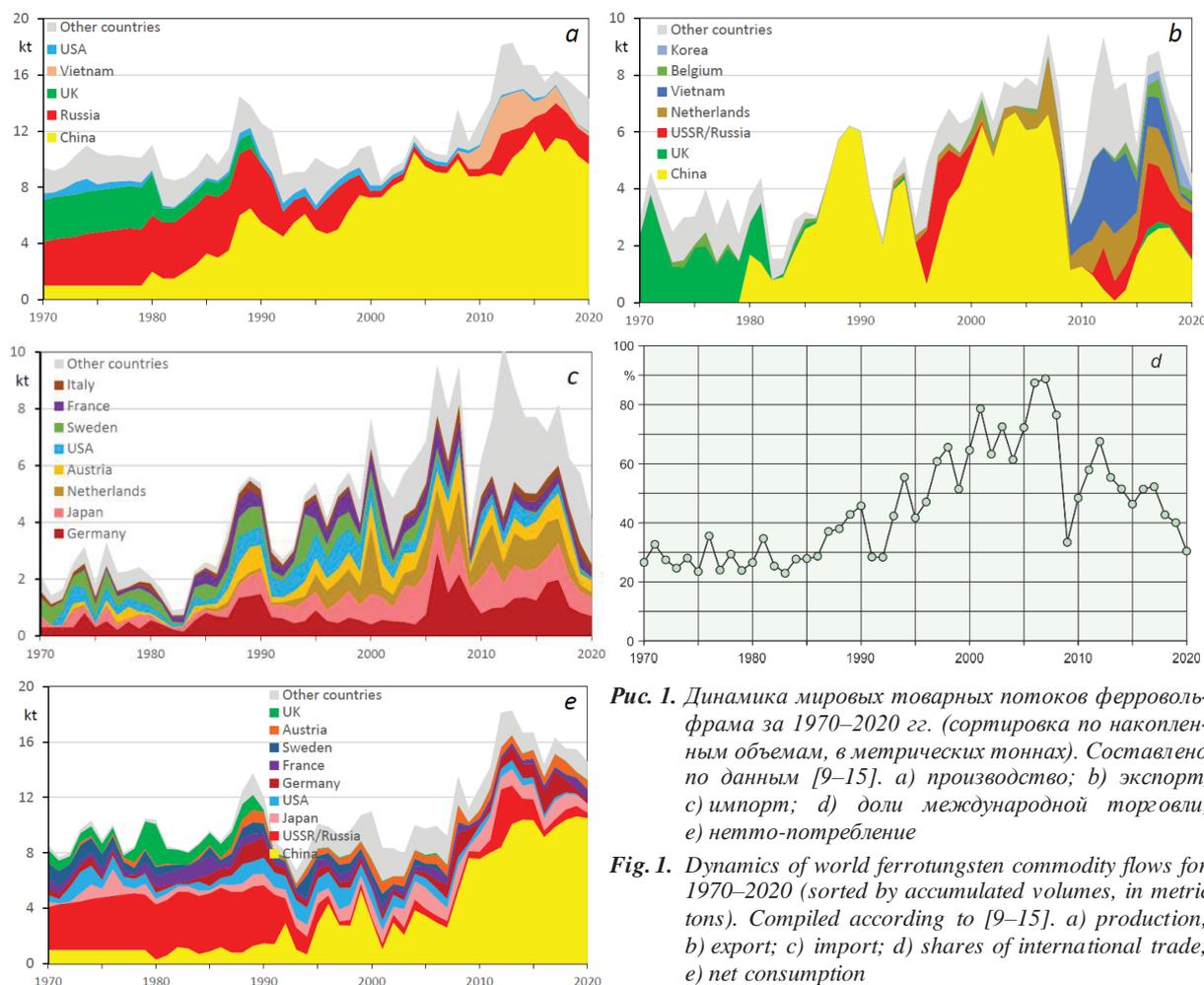


Рис. 1. Динамика мировых товарных потоков ферровольфрама за 1970–2020 гг. (сортировка по накопленным объемам, в метрических тоннах). Составлено по данным [9–15]. а) производство; б) экспорт; в) импорт; д) доли международной торговли; е) нетто-потребление

Fig. 1. Dynamics of world ferrotungsten commodity flows for 1970–2020 (sorted by accumulated volumes, in metric tons). Compiled according to [9–15]. а) production; б) export; в) import; д) shares of international trade; е) net consumption

В динамике международной торговли ферровольфрамом (рис. 1, *b, c*) можно отметить следующее:

- общая тенденция увеличения суммарных объемов мировой торговли ферровольфрамом с 1,5–3,0 тыс. т/год в 1970-х гг., до 6–9 тыс. т/год в 2010-х гг., несмотря на их просадки в 1982–1983 гг., в 2009 г. (весьма значительной) и в 2019–2020 гг.;
- неупорядоченность источников и объемов предложения ферровольфрама на мировой рынок – переменчивость лидеров торговли – Китая (до 84 %), Британии (до 83 %), России (до 36 %), Вьетнама (до 33 %), скачки годового экспорта/импорта от 1,5 до 9,3 тыс. т/год;
- значительное число стран-импортеров, импортирующих небольшие объемы этого продукта (50–300 т/год) кроме лидеров импорта ферровольфрама (Германия, Япония, Нидерланды, Австрия, США, Швеция, Франция, Италия);
- Нидерланды – страна-транзитер ферровольфрама – экспортирует большую часть – 49–100 % своего импорта.

Динамика долей объемов международной торговли ферровольфрамом не отражает динамики мирового потребления этого продукта с просадкой спроса в 1990-е гг. Наоборот первоначально объемы экспорта/импорта возрастали с 26 % в 1970 г. до 88 % в 2007 г., а затем снижались вплоть до 30 % в 2020 г. (рис. 1, *d*).

Лидером потребления ферровольфрама в 1970–1980-е гг. являлся СССР – 3–4 тыс. т/год (36–50 % мирового спроса) – в основном для производства танковой брони, но с 1993 г. наблюдается его снижение до уровня 0,5–1,8 тыс. т/год (3–7 %), сохраняемое до настоящего времени (рис. 1, *e*). Китай же, потребляя в 1970-х гг. 0,5–2,0 тыс. т/год (6–12 % мирового спроса) ферровольфрама, начиная с 1995 г. наращивает его потребление вплоть до 10,7 тыс. т (69 % мирового спроса) в 2019 г. Для Японии, США и Австрии практически весь период имеет место стабильное потребление ферровольфрама на уровне, соответственно, по странам (тыс. т/год): 0,5–1,5, 0,1–0,8, 0,2–1,2. В 2000–2010-е гг. выросло потребление ферровольфрама в Германии (с 0,1–0,5 до 1,3 тыс. т/год). В 1970–1990-е гг. достаточно высокий уровень потребления ферровольфрама (0,5–1,5 тыс. т/год) наблюдался во Франции, Швеции и Британии, но начиная с 2000-х гг. он сократился до исчезающе малых величин.

В целом на производство ферровольфрама приходится до 11 % мирового потребления вольфрамового сырья, что соответствует уровню его использования на производство данного продукта в США, так и в Европейском Союзе [19].

*Металлический вольфрам*, как и ферровольфрам, большей частью используется для производства специализированных износостойких и коррозионностойких сплавов из стали, а также высокопрочных изделий военного назначения (броневые кинетические снаряды и пули, элементы брони). Используется также в виде проволоки в электротехнике для ламп накаливания, электрических контактов; элементов в осветительных и электронных лампах; рентгеновских

трубок; электродов для аргонно-дуговой сварки; нагревательных элементов в высокотемпературных вакуумных электропечах.

Производится металлический вольфрам преимущественно путем отжига паравольфрамата аммония до оксида вольфрама и последующего термического восстановления этого оксида водородом в трубчатых печах [20]. Развиваются также технологии электрохимического производства металлического вольфрама (преимущественно при переработке вольфрамовых отходов) [21, 22].

В динамике мирового предложения вольфрама металлического за последние 50 лет можно выделить три периода (рис. 2, *a*):

- 1970–1980-е гг. в условиях холодной войны при спросе на броневую сталь и броневые элементы оружия – тренд слабого, но прогрессивного роста, с 22,6 тыс. т в 1970 г. до 33,2 тыс. т в 1990 г. (+2,0 %/год);
- 1990-е гг. – просадка мирового предложения на 50–58 % в результате сокращения продукции военного назначения и стагнации экономики СССР/России до 14–16 тыс. т/год;
- 2000–2010-е гг. – бурный рост мирового потребления вольфрама на фоне соответствующего экономического развития промышленности Китая с 19,7 тыс. т в 2001 г. до 42,3 тыс. т в 2016 г. (+5,2 %/год).

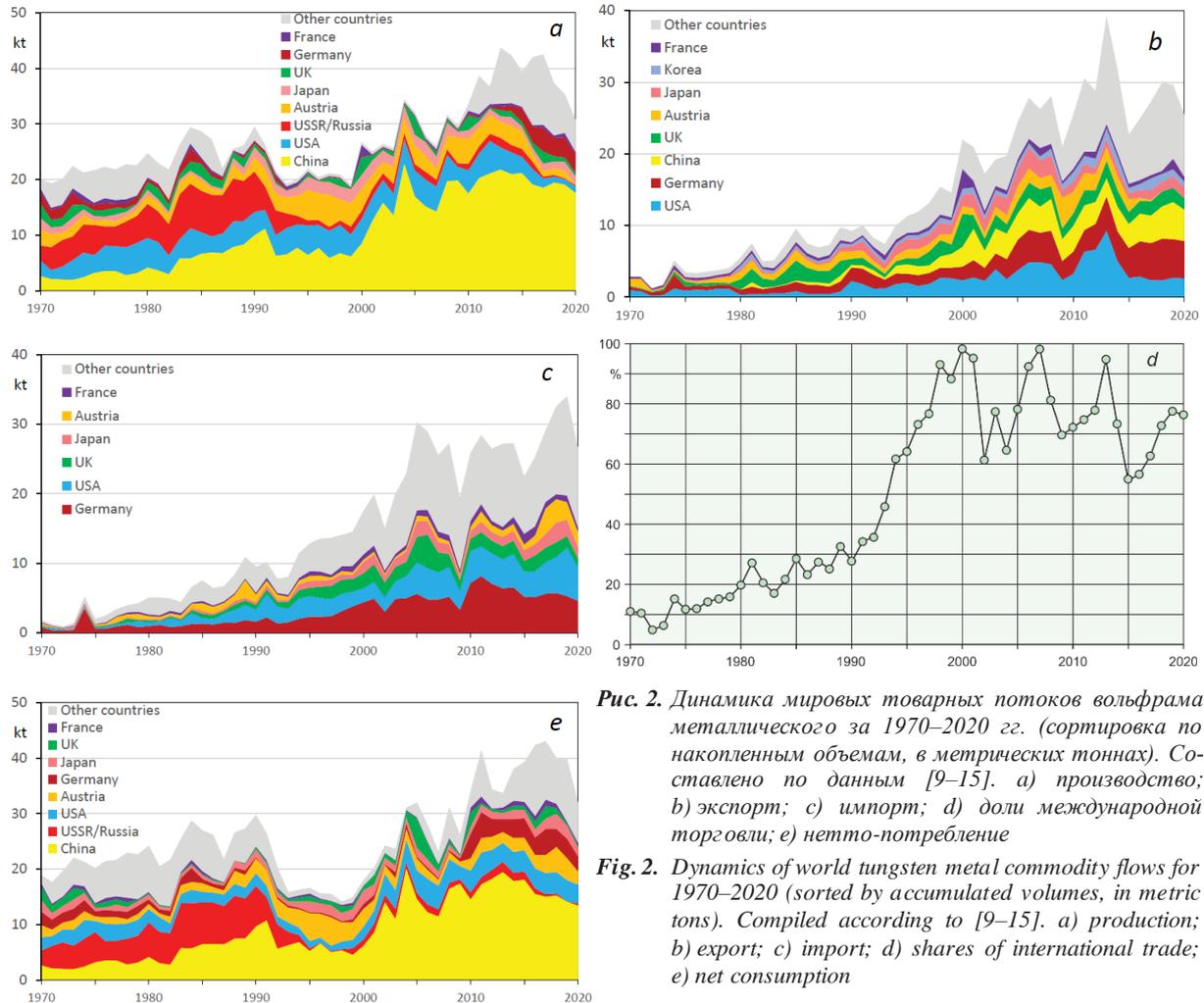
В 1970–1980-е гг. в производстве металлического вольфрама лидировал СССР, выпускавший 4–10 тыс. т/год (17–34 % от мирового предложения), но в кризисные 1990-е гг. российский выпуск этого продукта снизился до 0,6–1,6 тыс. т/год (4–10 %), а в 2000–2010-е гг. объемы его выпуска несколько возросли (до 0,9–1,7 тыс. т/год), но доли российского предложения от мирового уменьшились (2–4 %).

Китай, являясь лидером предложения вольфрамового сырья, в течении всего периода неуклонно увеличивает производство вольфрама металлического с 3,1 тыс. т в 1970 г. (14 % от мирового предложения) до 20–25 тыс. т/год в 2010-е гг. XXI в. (50–64 % мирового спроса) при темпах прироста его выпуска +3,8 %/год. Даже в период мирового спада производства металлического вольфрама в 1990-е гг. и в период экономического кризиса 2008 г. падение предложения этого продукта в Китае было незначительным.

Третий мировой лидер производства металлического вольфрама в 1970-е гг. – США (2,3–4,8 тыс. т/год, 10–15 % от мирового предложения) к 1990-м гг. снизил предложение до 0,5–1,5 тыс. т/год (1–3 %), но в 2000–2010-е гг. нарастил выпуск этого товарного продукта до 4,0–8,6 тыс. т/год (1–5 %), а с 2015 г. опять свернул производство до 1,1–2,8 тыс. т/год (3–7 %). Наиболее стабильно производство металлического вольфрама в Австрии, чье предложение в течении всего периода составляет 1–4 тыс. т/год. Британия, в 1970–1980-е гг. выпускавшая значительное количество вольфрама металлического – 1,0–2,9 тыс. т/год, в последующий период выпускает 0,5–1,0 тыс. т/год. В Японии при стабильном производстве металличе-

ского вольфрама 1,0–1,5 тыс. т/год в 1990–2000-е гг. наблюдалось повышение объемов выпуска до 2,0–2,5 тыс. т/год. Аналогично, Германия, произво-

дившая 0,5–2,0 тыс. т/год вольфрама металлического, начиная с 2010 г. нарастила предложение этого товарного продукта до 3,4–11,8 тыс. т/год.



**Рис. 2.** Динамика мировых товарных потоков вольфрама металлического за 1970–2020 гг. (сортировка по накопленным объемам, в метрических тоннах). Составлено по данным [9–15]. а) производство; б) экспорт; в) импорт; д) доли международной торговли; е) нетто-потребление

**Fig. 2.** Dynamics of world tungsten metal commodity flows for 1970–2020 (sorted by accumulated volumes, in metric tons). Compiled according to [9–15]. a) production; b) export; c) import; d) shares of international trade; e) net consumption

В международной торговле металлическим вольфрамом (рис. 2, б, в) имеет место уверенный рост его физических объемов с 2–5 тыс. т/год в 1970-е гг. до 25–30 тыс. т/год в 2010-е гг. с темпами прироста +5,6 %/год. Это обусловлено увеличением объемов экспорта из Китая (+5,2 %/год), Германии (+11,2 %/год) и Австрии (+10,8 %/год), а также из множества источников других стран-производителей (Италия, Бельгия, Чехия и др.) и стран транзитной торговли (Нидерланды, Швейцария, Израиль и др.). Следует отметить снижение экспорта металлического вольфрама из США (с 6 тыс. т в 2006 г. до 1,3–2,7 в 2015–2017 гг.). Увеличился импорт в Германию (+22,0 %/год) и США (+17,2 %/год). Основные экспортеры металлического вольфрама – Германия (до 20 % мировой торговли), Китай (до 17 %) и США (до 15 %). Основные импортеры – США (до 34 %) и Германия (до 28 %). Налицо крупные объемы транзитной торговли карбидом вольфрама в Германии, США, Британии, Японии и Нидерландах.

Доля объемов международной торговли металлическим вольфрамом от его производства первонач-

ально медленно возрастала с 5 % в 1973 г. до 36 % в 1992 г., а затем резко увеличилась до 98 % в 2000 г., что обусловлено значительном возрастанием объемов транзитной торговли этим товарным продуктом (рис. 2, д). В дальнейшем доля международной торговли вольфрамом металлическим меняется в широких пределах (от 55 до 98 %), что тоже свидетельствует о высоких объемах транзитных операций.

Лидером потребления металлического вольфрама в 1970–1980-е гг. являлся СССР – 4,0–7,5 тыс. т/год (15–29 % мирового спроса), но с 1993 г. в результате стагнации промышленного производства наблюдается его снижение до уровня 0,3–1,6 тыс. т/год (2–8 %), сохраняемое до настоящего времени (рис. 2, е). Китай же, первоначально потребляя в 1970-х гг. 2,1–4,2 тыс. т/год (9–17 % мирового спроса) вольфрама металлического, начиная с 1983 г. наращивает его использование вплоть до 17,4 тыс. т (66 %) в 2009 г., а в дальнейшем в 2010-е гг. сохраняет высокий уровень потребления этого продукта – 14–19 тыс. т/год (35–53 % мирового потребления). Относительно стабильное потребление металлического вольфрама имеет место

в США (3–4 тыс. т/год) и Австрии (1,5–3,0 тыс. т/год), причем в 1990-е гг. была просадка потребления в США до 1–2 тыс. т/год и почти синхронное увеличение спроса в Австрии до 3–5 тыс. т/год. Германия длительное время потребляла 1–3 тыс. т/год вольфрама металлического, но начиная с 2010 г. произошло значительное увеличение спроса до 3–5 тыс. т/год. Также следует отметить значительное увеличение спроса на металлический вольфрам в 2010-е гг. во множестве остальных стран мира – до 10–12 тыс. т/год, тогда как ранее они потребляли не более 1–2 тыс. т/год.

Карбид вольфрама используется преимущественно для производства износостойких элементов режущих инструментов, в выплавке самой инструментальной стали, в составе напыления (стеллита) металлических деталей для повышения их износостойкости, а также высокопрочных изделий военного назначения.

Производится карбид вольфрама, как и металлический вольфрам, путем отжига паравольфрамата аммония до оксида вольфрама, с последующим восстановлением его в трубчатых печах углеродом [20].

Развиваются также технологии электрохимического [21, 22] и плазмохимического [23, 24] производства карбида вольфрама.

Динамика мирового производства карбида вольфрама в принципе повторяет тренды изменений мирового рынка вольфрама металлического с теми же тремя знаковыми периодами его развития (рис. 3, а):

- 1970-е гг. – с трендом прогрессивного роста с 19,0 тыс. т в 1970 г. до 28,7 тыс. т в 1980 г. (+4,3 %/год);
- 1980–1990-е гг. – не сопровождался просадками объемов производства, что указывает на меньшую долю использования карбида вольфрама в военных приложениях, и его мировое предложение оставалось по-прежнему достаточно высоким (17–28 тыс. т/год);
- 2000–2010-е гг. XXI в. – бурный рост мирового производства WC на фоне соответствующего экономического развития китайской промышленности с 22,9 тыс. т в 2000 г. до 63,0 тыс. т в 2016 г. (+7,5 %/год).

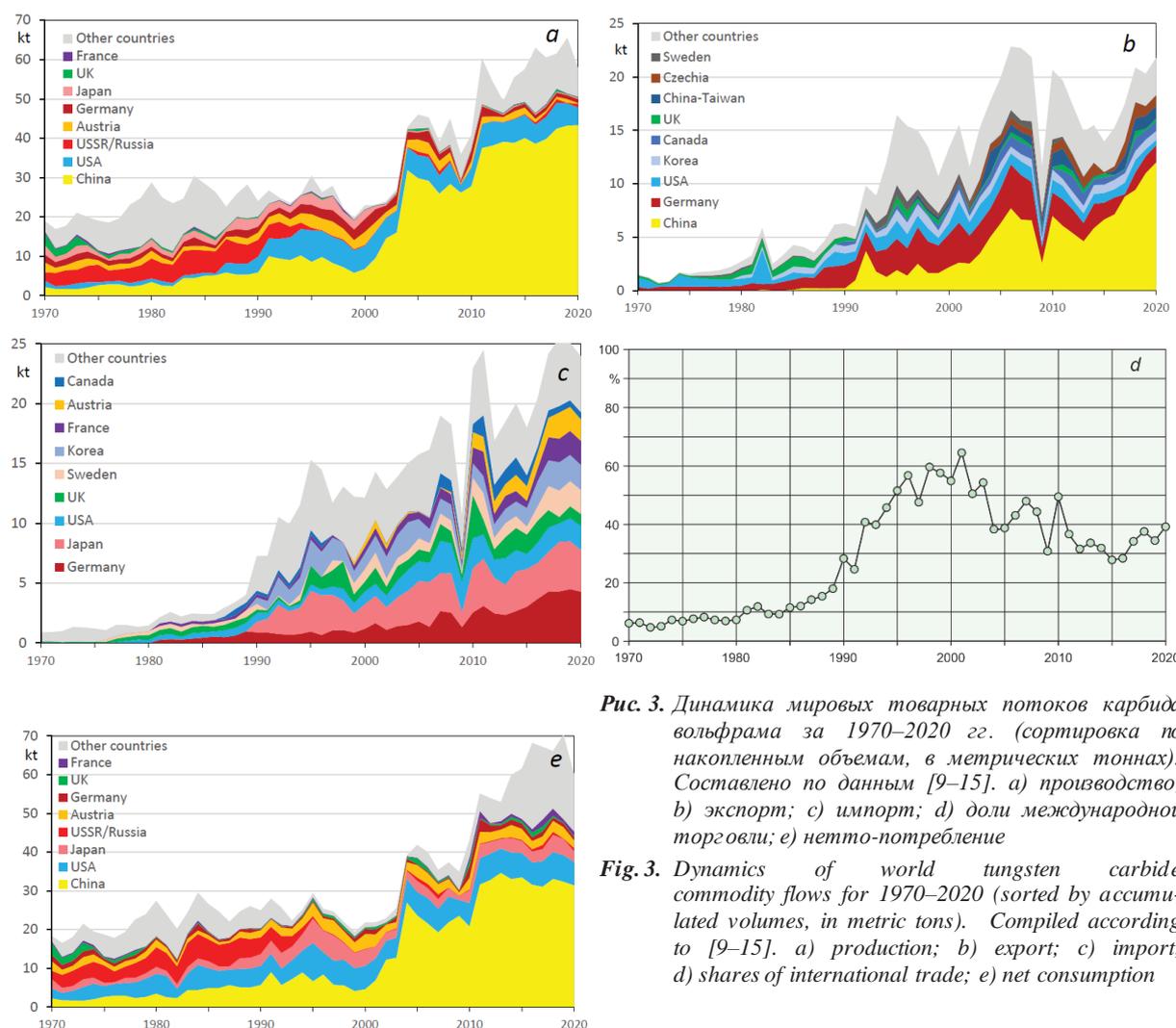


Рис. 3. Динамика мировых товарных потоков карбида вольфрама за 1970–2020 гг. (сортировка по накопленным объемам, в метрических тоннах). Составлено по данным [9–15]. а) производство; б) экспорт; в) импорт; д) доли международной торговли; е) нетто-потребление

Fig. 3. Dynamics of world tungsten carbide commodity flows for 1970–2020 (sorted by accumulated volumes, in metric tons). Compiled according to [9–15]. а) production; б) export; в) import; д) shares of international trade; е) net consumption

Первоначально, в 1970–1980-е гг., в производстве карбида вольфрама лидировал СССР, выпускавший 3–6 тыс. т/год (15–25 % от мирового предложения), но начиная с 1995 г. на фоне свертывания объемов металлообработки российский выпуск этого продукта снизился до 0,1–0,8 тыс. т/год (0,2–2,0 %) с сохранением такого низкого уровня до настоящего времени.

Китай в 1970–1980-е гг. наращивал производство карбида вольфрама с 2,2 тыс. т в 1970 г. до 10,0 тыс. т/год в 1991 г. (8–24 % от мирового предложения) при темпах прироста его выпуска +7,5 %/год. В 1990-е гг. китайское предложение этого товарного продукта составляло 6,8–10,2 тыс. т/год (29–40 %), причем имелся слабый тренд снижения предложения. Начиная с 2001 г. (9,6 тыс. т) начался стремительный рост китайского производства WC вплоть до 31,9 тыс. т в 2004 г. (75 % от мирового производства) при темпах прироста +49,5 %/год. В 2001–2010 гг. уровень китайского предложения карбида вольфрама уже составлял 26–30 тыс. т/год (65–73 %), но с 2011 до 2013 гг. его производство опять увеличилось до 39,1 тыс. т (79 %) и находится в таком состоянии до настоящего времени (39–43 тыс. т/год, 61–70 %). В целом прирост производства карбида вольфрама в Китае составил за период с 1970 по 2020 гг. +6,2 %/год.

США, производившие в 1970–1980-е гг. 0,7–1,4 тыс. т/год карбида вольфрама (2–8 % от мирового предложения), начиная с 1987 г. нарастили выпуск этого товарного продукта к 1994 г. до 6,6 тыс. т (26 %) и в последующее время сохраняют этот относительно высокий уровень (4–7 тыс. т/год, 10–25 %), занимая вторую позицию в мировом рейтинге производителей.

Стабильно производство карбида вольфрама в Австрии, чье предложение в течение всего периода составляло, соответственно, 1–2 тыс. т/год, причем в 1994–2000 гг. наблюдалось локальное повышение до 2,3–3,5 тыс. т/год. Япония, в 1970–1990-е гг. выпускавшая 1,2–2,8 тыс. т/год карбида вольфрама, в последующий период сократила производство до 0,1–0,3 тыс. т/год, перейдя преимущественно на импорт этого товарного продукта. В Британии до 1973 г. производилось 2,4–3,1 тыс. т/год карбида вольфрама, в дальнейшем сократился его выпуск до 0,2–0,5 тыс. т/год. Напротив, Германия, производившая 0,5–2,0 тыс. т/год карбида вольфрама, начиная с 2010 г. нарастила предложение этого товарного продукта до 3,4–11,8 тыс. т/год. Следует отметить, что значительная доля производства карбида вольфрама в 1970–1980-е гг. приходится на прочие страны мира (5,2–12,5 тыс. т/год, 23–49 % от мирового предложения), причем в 1990–2000-е гг. его выпуск из этой группы стран сократился (0,5–3,9 тыс. т/год, 2–12 %), но в 2010-е гг. опять возрос до 7,3–11,8 тыс. т/год. При этом доля прочих стран в мировом предложении карбида вольфрама начиная с 1990-х гг. уже ниже – 12–26 %.

В международной торговле карбидом вольфрама (рис. 3, *b*, *c*) темпы роста его объемов более значительны, чем для металлического вольфрама – с 0,7–1,5 тыс. т/год в 1970-е гг. до 15–20 тыс. т/год в 2020-е гг. с темпами +5,5 %/год. Это обусловлено в первую очередь ростом объемов экспорта из Китая с

0,25 тыс. т в 1990 г. до 12,0 тыс. т в 2020 г. (+12,5 %/год). Снижился экспорт из Германии с 2–4 тыс. т/год в 1990-е и 2000-е гг. до 1,6 тыс. т в 2020 г. (–2,0 %/год). Основным экспортером карбида вольфрама – Китай, поставляющий на мировой рынок 30–55 % объемов торговли этим продуктом. С большим отрывом по объемам экспорта идут поставки из Германии, США и Южной Кореи. Главными импортерами карбида вольфрама являются Германия, Япония, США, Швеция, Южная Корея, Франция и Австрия. Увеличился импорт в Германию – до 4,5 тыс. т в 2019 г. (+8,1 %/год), и Японию – до 4,0 тыс. т в 2018 г. (+2,9 %/год). Налицо крупные объемы транзитной торговли карбидом вольфрама в Германии, США, Южной Корее и Британии.

Доли объемов международной торговли карбидом вольфрама первоначально медленно возрастали с 5 % в 1972 г. до 18 % в 1989 г., а затем резко увеличились до максимума 65 % в 2001 г. (рис. 3, *d*). В дальнейшем наблюдается тенденция снижения доли до 25 % в 2015 г., что обусловлено увеличением внутреннего потребления карбида вольфрама в Китае для производства продукции с большей прибавочной стоимостью. Лишь в дальнейшем наметился слабый тренд роста международной торговли карбидом вольфрама вплоть до 40 % в 2020 г., как результат увеличения транзитной торговли этим товарным продуктом.

Лидером потребления карбида вольфрама (как и металлического вольфрама) в 1970–1980-е гг. являлся СССР – 3–6 тыс. т/год (15–28 % мирового спроса), но с 1993 г. в результате стагнации промышленного производства и, в первую очередь, металлообработки наблюдается его снижение до уровня 0,2–1,0 тыс. т/год (0,5–1,2 %), сохраняемое до настоящего времени (рис. 3, *e*).

Китай, потребляя в 1970-х гг. 1,7–3,5 тыс. т/год (10–14 % мирового спроса) карбида вольфрама, начиная с 1983 г. наращивает его использование, в 1986 г. опередив по объемам спроса СССР, вплоть до локального максимума 27,0 тыс. т (69 %) в 2004 г., с просадкой спроса до 19,3 тыс. т (55 %) в 2007 г., дальнейшим ростом до 34,6 тыс. т (55 %) в 2014 г. и сохраняет высокий уровень потребления этого продукта (в первую очередь при металлообработке) в дальнейшем (31–33 тыс. т/год, 46–54 %). Средний прирост потребления карбида вольфрама в Китае за весь период 19970–2020 гг. составил +5,5 %/год.

В США в 1970–1980-е гг. потребление карбида вольфрама составляло 0,5–1,7 тыс. т/год, 2–8 % мирового потребления), но начиная с 1987 г. спрос начал расти до 6,7 тыс. т в 1995 г. (30 %). В дальнейшем потребление WC в США сохраняется на этом высоком уровне (4,4–6,6 тыс. т/год), отвечая второму месту в мировом рейтинге потребления, но в объемах мирового спроса доля потребления карбида вольфрама в США сокращается (с 28 % в 2001 г. до 8 % в 2020 г.).

Япония, являясь третьим лидером мирового потребления карбида вольфрама, стабильно использует 1,2–3,3 тыс. т/год этого продукта, но в 1990-х гг. имело место увеличение его спроса до 3,3–6,5 тыс. т/год. Достаточно стабильное потребление карбида воль-

фрама имеет место в Австрии (1,3–3,7 тыс. т/год). Также следует отметить значительное увеличение спроса на карбид вольфрама (как и в случае вольфрама металлического) в 2010-е гг. в остальных странах мира – до 10–22 тыс. т/год, когда ранее они потребляли не более 1–4 тыс. т/год.

В совместной динамике долей объемов мирового потребления конечных вольфрамовых продуктов отмечаются следующие тенденции:

- наличие трех периодов изменчивости спроса: слабого тренда роста в 1970–1980-е гг. с 39 до 63 тыс. т/год от суммы конечных вольфрамовых продуктов в пересчете на 100 % W, спада потребления в 1990-х гг. до 40 тыс. т/год и бурного роста спроса на

конечные вольфрамовые продукты в 2000–2010-х гг. (до 119 тыс. т/год) (рис. 4, a, b);

- изменения объемов потребления металлического вольфрама и карбида вольфрама конформно друг другу, но начиная с 1991 г. спрос на карбид вольфрама превышает объемы потребления вольфрама металлического (за счет большего снижения спроса на последний в 1990-е гг.), а начиная с 2011 г. превышение спроса на карбид вольфрама стало весьма значительным (рис. 4, b, c)
- доли вольфрама металлического и ферровольфрама во времени имеют тенденцию к снижению: соответственно, с 44 и 16 % в 1970 г. до 32 и 11 % в 2020 г., а для карбида вольфрама – тренд роста с 40 % в 1970 г. до 57 % в 2020 г. (рис. 4, c).

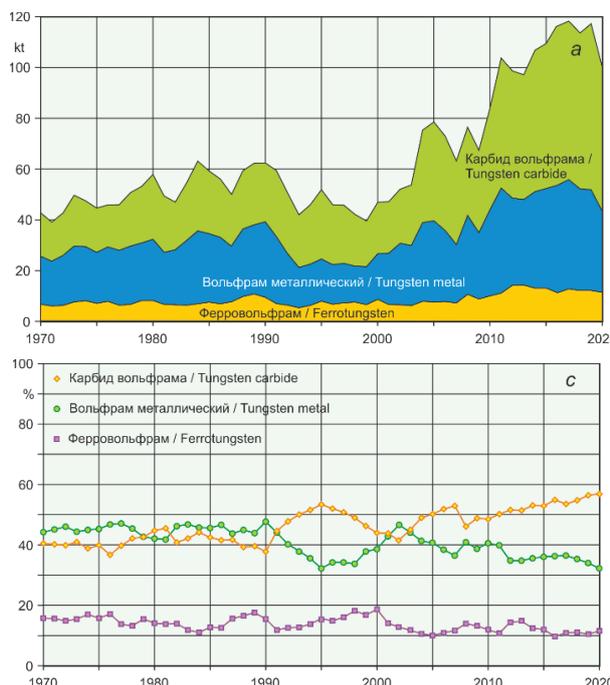


Рис. 4. Динамика накопительных (a) и индивидуальных (b) объемов, а также долей потребления конечных товарных вольфрамовых продуктов от их общей суммы (c) за 1970–2020 гг. (в пересчете на 100 % W). Составлено по данным [9–15]

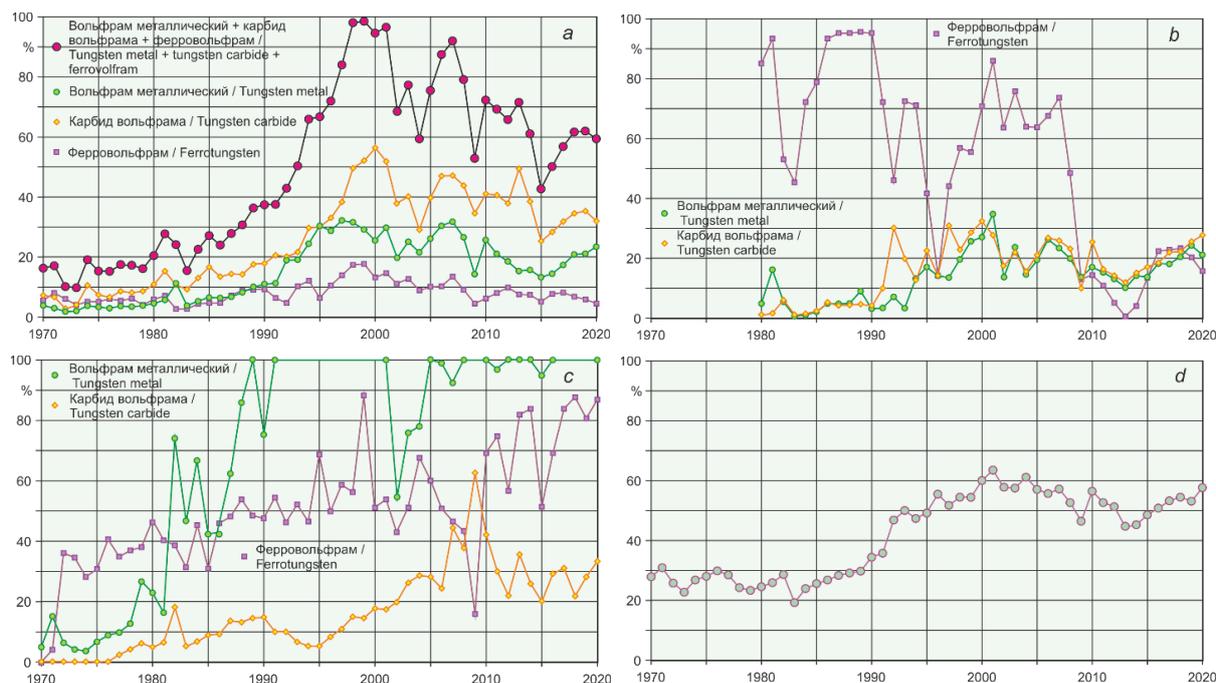
Fig. 4. Dynamics of cumulative (a) and individual (b) volumes as well as shares of consumption of final commodity tungsten products from their total amount (c) for 1970–2020 (in terms of 100 % W). Compiled according to [9–15]

В динамике долей международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами от суммы объемов их мирового предложения (в пересчете на 100 % W) отмечаются следующие тенденции (рис. 5, a):

- рост долей международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами с 20 % в 1970 г. вплоть до максимума в 2000 г. (91 % суммы конечных продуктов и 63 % металлического вольфрама) с темпами приращения +10,1 %/год для суммы конечных продуктов и +10,7 %/год для металлического вольфрама; рост долей мировой торговли карбида вольфрама тоже имеет место, но площадка максимальных долей в 20–25 % была достигнута к 1995 г. хотя темпы прироста были соизмеримыми с изменениями товарных потоков вольфрама металлического (+10,7 %/год);
- начиная с 2001 г. происходит спад доли международной торговли и суммы конечных вольфрамовых продуктов (до 34 %), вольфрама металличе-

ского и (до 22 %) и карбида вольфрама (до 12 %) в 2015 г.; темпы изменений были соответственно: –6,3, –6,8 и –4,8 %/год.

В динамике долей экспорта конечных вольфрамовых продуктов из Китая (лидера их мирового производства) отмечается период роста долей вольфрама металлического и карбида вольфрама в 1970–2001 гг., когда доля W выросла с 5 до 32 %, а WC – с 1 до 35 % (рис. 5, b). В дальнейшем доли экспорта этих товарных продуктов соизмеримы между собой и флуктуируют в диапазоне 15–30 %. Для ферровольфрама примечателен высокий уровень доли экспорта в период 1980–2008 гг. (50–95 %) и довольно низкий уровень доли экспорта в дальнейшем (5–22 %). Отмечаются синхронные просадки долей экспорта всех конечных вольфрамовых продуктов в 1996, 2002, 2004, 2009, 2012–2014 гг., что свидетельствует о серьезной зависимости объемов реализации конечных вольфрамовых продуктов от внутренних и внешних экономических факторов.



**Рис. 5.** Динамика долей международной торговли конечными товарными вольфрамовыми продуктами от суммы объемов их мирового предложения (в пересчете на 100 % W), а также долей в международной торговле стран-лидеров национального экспорта (от производства) и импорта (от потребления) конечных товарных вольфрамовых продуктов за 1970–2020 гг. Составлено по данным [9–15]. а) доли международной торговли конечными товарными вольфрамовыми продуктами от суммы объемов предложения первичного вольфрама и вольфрама в составе вторичных отходов (в пересчете на 100 % W); б) доля экспорта конечных вольфрамовых продуктов из Китая от их национального производства; в) доля импорта конечных вольфрамовых продуктов в США от их национального потребления; д) доли объемов международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами от суммарных мировых объемов торговли всеми вольфрамовыми продуктами

**Fig. 5.** Dynamics of shares of international trade in final commodity tungsten products from the sum of their world supply (in terms of 100 % W), as well as the shares in international trade of the leading countries of national exports (from production) and imports (from consumption) of final commodity tungsten products for 1970–2020. Compiled according to [9–15]. a) share of international trade in final commodity tungsten products from the sum of the supply of primary tungsten and tungsten in the composition of secondary waste (in terms of 100 % W); b) share of China's exports of final tungsten products from its national production; c) share of U.S. imports of final tungsten products from its national consumption; d) share of international trade volumes of final tungsten products from the total world trade volumes of all tungsten products

В динамике долей импорта конечных вольфрамовых продуктов в США (лидера их мирового импорта) следует отметить тенденцию общего для всех продуктов роста долей импорта во времени: для карбида вольфрама с 3 % в 1978 г. до 33 % в 2020 г. (с локальным максимумом в 2009 г. (63 %)), для ферровольфрама – с 5 % в 1971 г. до 100 % в 2017 г. (со значительным локальным минимумом в 2009 г. (19 %)), а для вольфрама металлического – с 5 % в 1970 г. до 100 % в 1989 г., и в последующем объемы импорта W в большей части времени превышали объемы национального потребления (рис. 5, с).

В целом доля объемов конечных вольфрамовых продуктов в международной торговле всех вольфрамовых продуктов увеличилась с 19–30 % в 1970–1980-е гг. до 64 % в 2001 г., но впоследствии несколько снизилась, флуктуировала в диапазоне 45–58 %, в 1910-е гг. (рис. 5, д). Последнее снижение обусловлено увеличением национального потребления вольфрама металлического и карбида вольфрама непосредственно в странах их производства (Китай,

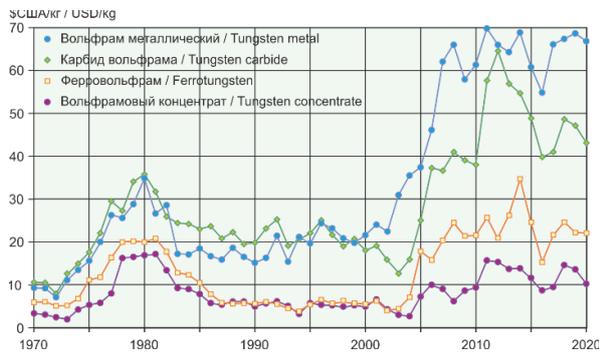
США, Германия и др.) и увеличением международной торговли более ценными товарами, включающими в свой состав вольфрамовые продукты (инструменты с твердосплавными деталями, тугоплавкие, жаропрочные и кислотоупорные стали, износостойкие покрытия и др.).

Цены на конечные вольфрамовые продукты (рис. 6) в принципе повторяют динамику цен на вольфрамовый концентрат с различной степенью интенсивности изменений.

Отчетливо наблюдается всплеск цен в 1977–1981 гг.: ферровольфрам – с 5–7 до 20–21 USD/kg (300–400 %), вольфрам металлический – с 7–11 до 26–35 USD/kg (320–370 %) и карбид вольфрама – с 8–11 до 27–34 USD/kg (310–340 %).

В дальнейшем с 1983 г. цены на ферровольфрам снизились до уровня начала 1970-х гг., в то же время просадка цен на металлический вольфрам и карбид вольфрама была незначительна, и до 2001 г. они составляли 16–24 и 18–25 USD/kg, соответственно. Примечательно, что в 1983–1995 гг. цены на карбид воль-

фрама превышали цены на вольфрам металлический, а в 2004–2006 и 2111–2012 гг. темпы прироста цен первых опережали увеличение цен вторых, но при этом не превысили цен на металлический вольфрам.



**Рис. 6.** Динамика среднмировых цен на товарные конечные вольфрамовые продукты за 1970–2020 гг. Составлено по данным Геологической службы США [9], информационного агентства TrendEconomy [11] и информационной службы ООН [13]

**Fig. 6.** Dynamics of global average prices of commodity final tungsten products for 1970–2020. Compiled according to the US Geological Survey [9], the TrendEconomy [11] and the UN Information Service [13]

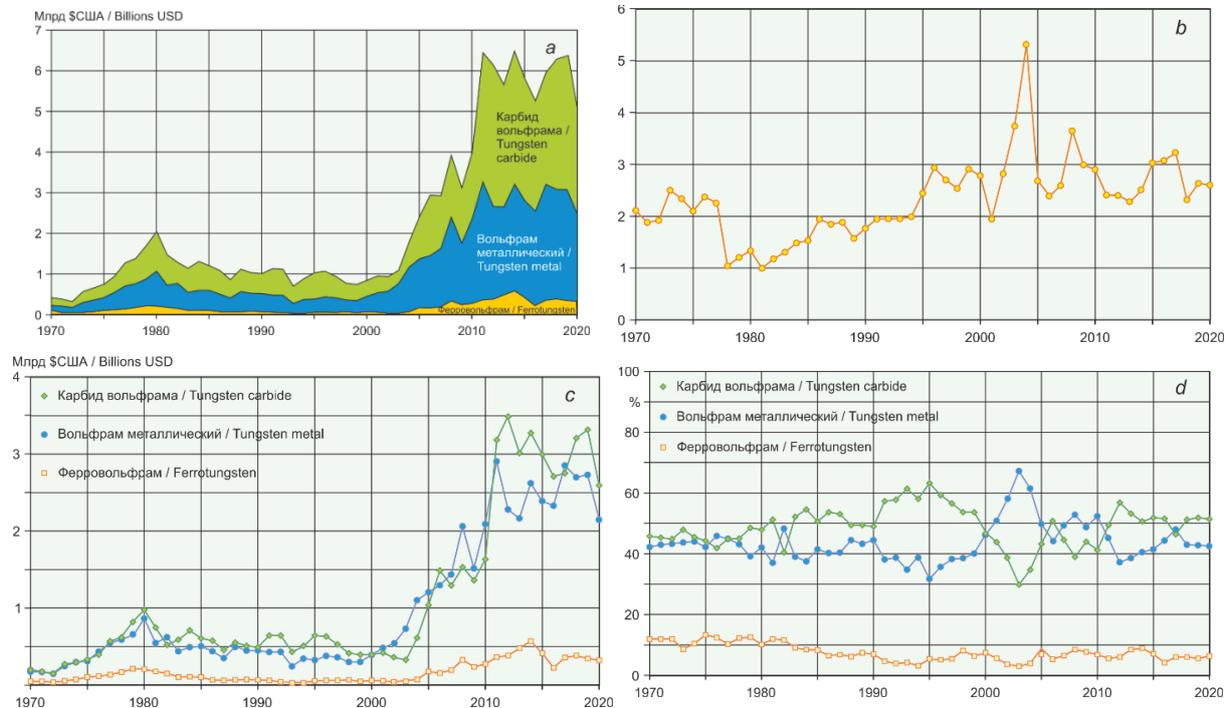
В 2001–2003 гг. начался рост цен на все вольфрамовые продукты, продолжавшийся до их относительной стабилизации в 2007–2020 гг.: ферровольфрам – с 4–6 до 17–25 USD/kg (410–420 %), вольфрам металли-

ческий – с 20–23 до 55–70 USD/kg (270–300 %) и карбид вольфрама – с 15–20 до 40–55 USD/kg (260–270 %).

Примечательно, что изменения цены на ферровольфрам (учитываемый как конечный товарный продукт) за весь исследуемый период 1970–2020 гг. больше коррелирует с сырьевыми вольфрамовыми продуктами (и ближе к ним по уровню цен), чем с ценами на конечные товары (вольфрам металлический и карбид вольфрама).

Следует отметить локальные периоды просадки цен одновременно для всех вольфрамовых продуктов в 2009–2010 гг. (последствия всемирного финансового кризиса) и в 2015–2016 гг. (отклик на временное избыточное предложение вольфрамовых продуктов, в первую очередь из Китая) [25] (рис. 6).

*Стоимость товарных потоков конечных вольфрамовых продуктов.* Динамика оцененной стоимости суммы конечных вольфрамовых продуктов в принципе повторяет динамику изменений цен на вольфрамовые продукты с периодами повышения в 1973–1985 гг. (до 2,0 млрд USD/год) и в 2004–2020 гг. (до 6,4 млрд USD/год), а также снижения в период провала спроса в 1993–2002 гг. (0,6–1,1 млрд USD/год) (рис. 7, а). При этом стоимость суммы конечных вольфрамовых продуктов в течение всего периода превышает стоимость производства сырьевых вольфрамовых продуктов в 2–4 раза (рис. 7, б), что и определяет выгодность торговли товарами с большей прибавочной стоимостью.



**Рис. 7.** Динамика накопительной (а) и индивидуальной (с) стоимости мирового производства конечных товарных вольфрамовых продуктов, их индивидуальных долей стоимости от общей суммы (d) и отношения стоимости производства конечных вольфрамовых продуктов к стоимости производства сырьевых вольфрамовых продуктов (b) за 1970–2020 гг. Составлено по данным [9–15]

**Fig. 7.** Dynamics of cumulative (a) and individual (c) costs of world production of final commodity tungsten products, their individual cost shares of the total amount (d) and the ratio of the cost of production of final tungsten products to the cost of production of raw tungsten products (b) for 1970–2020. Compiled according to [9–15]

Динамика оцененной стоимости *ферровольфрама* повторяет динамику стоимости суммы конечных продуктов, но в значительно меньших масштабах с повышениями в 1974–1985 гг. (до 211 млн USD/год) и в 2005–2020 гг. (до 579 млн USD/год), а также снижением в 1993–2004 гг. (29–69 млн USD/год) (рис. 7, а, с). Доли же стоимости ферровольфрама в сумме стоимости конечных вольфрамовых продуктов во времени снижаются с 12 % в 1970 г. до 4 % в 2016 г. (рис. 7, с), как и доли его физических объемов (рис. 4, с).

Для *металлического вольфрама* и *карбида вольфрама* отмечаются синхронные периоды увеличения стоимости их производства в 1972–1980 гг. и 2003–2011 гг. и периоды относительной стабилизации в 1981–2002 гг. и 2012–2020 гг., полностью обусловленные влиянием ценового фактора, особенно подъемом цены и стоимости 2003–2011 гг. (рис. 7, с). В части долей стоимости металлического вольфрама и карбида вольфрама наблюдается их антагонизм в динамике, когда увеличение доли одного товара сопровождается снижением доли другого (рис. 7, d). Наиболее отчетливо это проявилось в период снижения объемов потребления вольфрама металлического на военные нужды в 1991–1999 гг. (фактор спроса) и опережения темпов роста цены металлического вольфрама над ростом цены карбида вольфрама в 2001–2004 гг. (ценовой фактор).

В динамике суммарной стоимости международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами наблюдается три периода изменений, отличающихся от динамики стоимости их мирового производства (рис. 8, а, h):

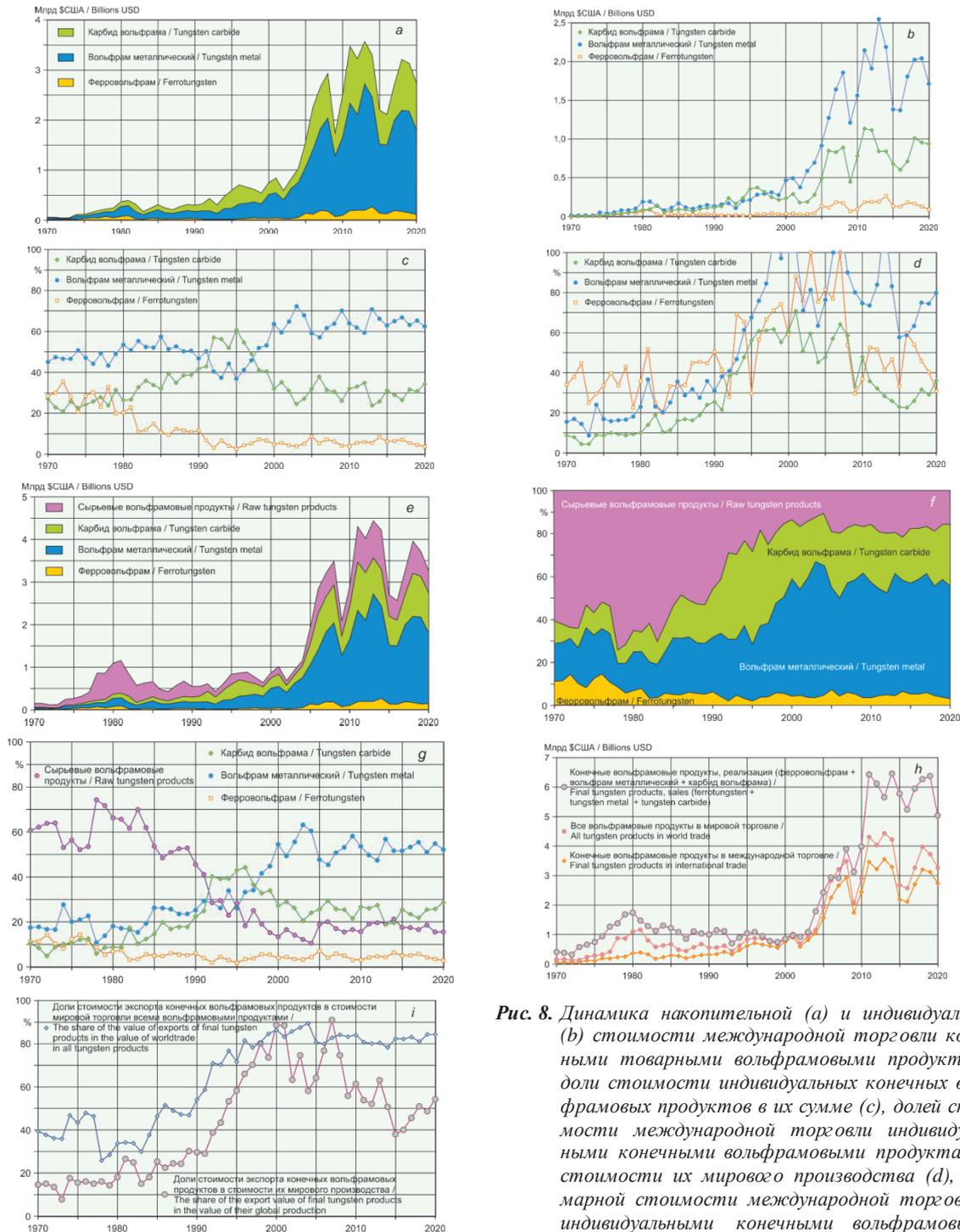
- 1) тренд роста в 1970–1990-е гг. с 60 млн USD в 1970 г. до 588 млн USD в 2002 г. (+7,4 %/год) с небольшими всплесками в 1979–1982 гг., 1992 г., 1994–1998 гг.;
- 2) исключительно резкое увеличение стоимости при ажиотажном спросе после 2002 г. вплоть до 2,9 млрд USD в 2008 г. (+32 %/год);
- 3) значительные скачки стоимости (с коэффициентом вариации 21 %) с подъемами до 3,6 млрд USD в 2011–2013 гг. и 3,2 млрд USD в 2018–2019 г., а также с просадками до 1,7 млрд USD в 2009 г. и 2,1 млрд USD в 2016 г.

Последнее является результатом резких изменений цен на отдельные конечные вольфрамовые продукты в периоды экономического кризиса 2008–2009 гг. и избытка предложения на мировом рынке в 2013–2016 гг.

Динамика стоимости мировой торговли *ферровольфрамом* отличается от динамики стоимости других конечных вольфрамовых продуктов только малой величиной изменений. Первый период роста стоимости для ферровольфрама завершился в 1981 г. достижением локального максимума в 60 млн USD, после чего вплоть до 2003 г. имел место низкий уровень стоимости спроса – 12–35 млн USD/год (+4 %/год), во второй период увеличение составило до 191 млн USD в 2007 г. (+30 %/год), после чего в третьем периоде уровень колебаний стоимости FeW составил 99–269 млн USD/год (с вариацией 35 %) (рис. 8, а, b, e). Но в долях стоимости торговли ферровольфрамом от суммы стоимости торговли конечными вольфрамовыми продуктами наоборот первоначально имеется тренд сни-

жения с 39 % в 1972 г. до 3 % в 1992 г., после чего они находились в диапазоне малых значений 3–7 % до настоящего времени (рис. 9, с). Доли стоимости торговли ферровольфрамом от стоимости их производства в 1970–1980-е гг. составляли 25–51 %, в 1990–2000-е гг. наметился тренд их увеличения до 75–100 %, а в 2010-е гг. опять снизились до прежнего диапазона 30–60 % (рис. 9, d). Доли стоимости ферровольфрама от суммы стоимости торговли всеми вольфрамовыми продуктами ожидаемо имеют более низкие значения: тренд снижения с 14 % в 1972 г. до 2 % в 1992 г., после чего они находились в диапазоне малых значений 3–6 % до настоящего времени (рис. 8, f, g). Динамика международной торговли ферровольфрамом значительно отличаются от параметров изменений мировой торговли вольфрамом металлическим и карбидом вольфрама (объемами, трендами изменений долей в торговле) и более схожи с изменениями торговли сырьевыми вольфрамовыми продуктами.

В динамике стоимости мировой торговли первый период роста для *вольфрама металлического* закончился в 1981 г. в виде локального максимума в 199 млн USD, после чего вплоть до 1993 г. для стоимости спроса наблюдался относительно стабильный уровень 110–175 млн USD/год, в конце 1990-х гг. наметилось увеличение торговых операций по металлическому вольфраму до 591 млн USD в 2003 г. с темпами роста +18,1 %/год, а в дальнейшем еще с большим ускорением вплоть до 1,8 млрд USD в пик экономического кризиса 2008 г. (+24,1 %/год), после чего наступил период 2009–2020 гг. со значительными по амплитуде колебаниями стоимости от 1,5 до 2,5 млрд USD/год (с вариацией 21 %) (рис. 8, а, b, e). Доли стоимости торговли вольфрамом металлическим от суммы стоимости торговли конечными вольфрамовыми продуктами в период стабильности в 1970–1980-е гг. находились примерно на одном уровне – в диапазоне 44–57 %, в начале 1990-х гг. за счет сокращения спроса на вольфрам для военного назначения доли этого товара уменьшились до 37 % в 1995 г., но в дальнейшем на фоне роста цен на вольфрам металлический его доля в стоимости конечных вольфрамовых продуктов опять начала возрастать вплоть до 72 % в 2003 г. В 2004–2020 гг., несмотря на опережающее увеличение объемов торговли карбидом вольфрама, доли торговли металлическим вольфрамом в конечных продуктах опять находятся на одном уровне – в диапазоне 57–70 % (рис. 8, с). По стоимости вольфрам металлический большую часть времени (кроме просадки в 1992–1997 гг.) остается главным товаром международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами. Доли стоимости торговли металлическим вольфрамом от стоимости его мирового производства с 15 % в 1970 г. непрерывно росли до 38 % в 1991 г., после чего темпы роста долей торговли этим товаром ускорились вплоть до 100 % в 1998 г., и высокие значения долей (60–100 %) в 1999–2020 гг. лишь свидетельствуют о появлении значительных объемов транзитной торговли вольфрамом в товарных потоках многих стран (рис. 8, d).



**Рис. 8.** Динамика накопительной (а) и индивидуальной (б) стоимости международной торговли конечными товарными вольфрамовыми продуктами, доли стоимости индивидуальных конечных вольфрамовых продуктов в их сумме (с), доли стоимости международной торговли индивидуальными конечными вольфрамовыми продуктами в стоимости их мирового производства (д), суммарной стоимости международной торговли и индивидуальными конечными вольфрамовыми продуктами и вольфрамовым сырьем в накопленном (е) и абсолютном исчислении (ф), долей индивидуальных конечных вольфрамовых продуктов суммы сырьевых вольфрамовых продуктов в мировой торговле (г), а также динамика стоимости мирового производства и международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами и всеми вольфрамовыми продуктами (h), и доли стоимости международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами от их производства и от мировой торговли всеми вольфрамовыми продуктами (i) за 2002–2020 гг. Составлено по данным [9–15]

**Fig. 8.** Dynamics of cumulative (a) and individual (b) value of international trade of final commodity tungsten products, the share of the value of individual final tungsten products in their sum (c), the share of the value of international trade of individual final tungsten products in the value of their world production (d), the total value of international trade of individual final tungsten products and tungsten raw materials in the accumulated (e) and absolute calculation (f), the shares of individual final tungsten products and the sum of raw tungsten products in world trade (g), as well as the dynamics of the cost of global production and international trade of final tungsten products and all tungsten products (h), and the share of the value of international trade in final tungsten products from their production and from world trade in all tungsten products (i) for 2002–2020. Compiled according to [9–15]

Доли стоимости вольфрама металлического от суммы стоимости торговли всеми вольфрамовыми продуктами (и сырьевыми, и конечными) ожидаемо ниже изменений долей только в сумме конечных продуктов, но при этом появился отчетливый тренд роста долей с 18 % в 1970 г. до 63 % в 2003 г., а в 2004–2020 гг. стабилизация примерно на одном уровне долей в диапазоне 45–58 % (рис. 8, *f, g*). Начиная с 1998 г. по стоимости вольфрам металлический стал главным товарным продуктом международной торговли вольфрамовыми товарами.

В динамике стоимости мировой торговли для *карбида вольфрама* выделяются несколько периодов изменений (рис. 8, *a, b, e*): 1) умеренного роста с 16 млн USD в 1970 г. до 138 млн USD в 1991 г. (+11,9 %/год); 2) периода активного спроса 1992–2003 гг. в диапазоне 170–384 млн USD/год, причем в 1992–1997 гг. карбид вольфрама являлся лидером продаж среди вольфрамовых продуктов; 3) увеличения торговых операций со 191 млн USD в 2003 г. до 892 млн USD в 2008 г. с темпами роста +35,8 %/год; 4) периода 2009–2020 гг. с колебаниями стоимости от 0,7 до 1,1 млрд USD/год (с вариацией 24 %). Доли стоимости торговли карбидом вольфрама от суммы стоимости торговли конечными вольфрамовыми продуктами в первый период роста стоимости увеличиваются с 27 % в 1970 г. до 43 % в 1991 г., а в период максимума объемов продаж карбида вольфрама в 1992–1997 гг. доли увеличились до пиковых 52–60 % торговли конечными вольфрамовыми продуктами. В дальнейшем имел место тренд снижения доли стоимости торговли карбидом вольфрама от конечных вольфрамовых продуктов вплоть до 24 % в 2003 г., а начиная с 2004 г. наблюдаются гармоничные колебания долей в диапазоне 26–38 % (рис. 8, *c*). Динамика долей стоимости торговли карбидом вольфрама от стоимости его мирового производства в 1970–1990-е гг. конформна динамике изменений долей вольфрама металлического, но в меньшем масштабе: рост с 8 % в 1970 г. до 25 % в 1990 г., ускоренный рост долей торговли этим товаром до 71 % в 2001 г. Но в дальнейшем появился тренд снижения долей международной торговли WC до 22 % в 2016 г. и последующий рост вплоть до 36 % в 2020 г. (рис. 8, *d*). Динамика долей стоимости карбида вольфрама от суммы стоимости торговли всеми вольфрамовыми продуктами, конечно же, ниже по уровню изменений долей в сумме конечных продуктов: рост с 8 % в 1970 г. до 25 % в 1991 г., пиковые значения в 39–44 % от торговли конечными вольфрамовыми продуктами в период максимума объемов продаж карбида вольфрама в 1992–1997 гг., снижение долей вплоть до 21 % в 2003 г. и гармоничные колебания долей в диапазоне 19–29 % долей торговли карбидом вольфрама в сумме конечных вольфрамовых продуктов в 2004–2020 гг. (рис. 8, *f, g*).

На рис. 9, *h* приводится динамика суммарной стоимости мирового производства конечных вольфрамовых продуктов с динамикой стоимости этой группы товаров и всех вольфрамовых продуктов в международной торговле.

Доли стоимости международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами от их мирового производства первоначально имели тренд слабого роста с 14 % в 1970 г. до 29 % в 1991 г., после чего произошло ускорение роста долей торговли вплоть до 89 % в 2000 г., спад же уровня долей произошел после максимума в 91 % в 2007 г. до 38 % в 2015 г., а в дальнейшем произошло медленное увеличение до 54 % в 2020 г. (рис. 8, *i*). Таким образом, в 1970–1990-е гг. наблюдался процесс замещения в международной торговле сырьевых вольфрамовых продуктов конечными вольфрамовыми продуктами с большей прибавочной стоимостью, а в 2000–2010-е гг. – снижение долей торговли конечными вольфрамовыми продуктами ввиду увеличения объемов их использования в национальном производстве. Доля же стоимости конечных вольфрамовых продуктов в мировой торговле суммы всех вольфрамовых продуктов, составлявшая в 1970–1980-е гг. 25–50 %, в 2010-е гг. увеличилась до 80–90 % (рис. 8, *i*).

#### Обсуждение результатов и выводы

Мировое производство конечных вольфрамовых продуктов (в пересчете на 100 % W) выросло с 42–52 тыс. т/год в 1970-х гг. до 100–119 тыс. т/год в 2010-х гг. с темпом прироста за 50-летний период +2,2 %/год.

В динамике мирового спроса на вольфрамовые продукты за последние 50 лет произошли значимые трансформации, обусловленные политическими и экономическими факторами:

- В 1970–1980-е гг. период обычного состояния мирового потребления конечных вольфрамовых продуктов с темпами прироста спроса на них +1,9 %/год.
- В 1990-е гг. значительное сокращение спроса на конечные вольфрамовые продукты (–4,9 %/год) в военной сфере (завершение холодной войны) и сокращение роли России на вольфрамовом рынке (последствия стагнации российской экономики, в первую очередь, металлообработки).
- В 2000–2010-е гг. бурный рост мирового спроса на конечные вольфрамовые товарные продукты, в первую очередь карбида вольфрама, ввиду экспоненциального наращивания возможностей китайской промышленности и, соответственно, мирового спроса и предложения вольфрамового сырья. Темпы прироста спроса на конечные вольфрамовые продукты в этот период составили +6,7 %/год. Лидерами производства к 2020 г. являются:
- ферровольфрама – Китай (12,0 тыс. т, 68 % от мирового предложения), Россия (2,0 тыс. т, 14 %) и Вьетнам (0,25 тыс. т, 1,7 %);
- вольфрама металлического – Китай (17,7 тыс. т, 57 %), Германия (2,1 тыс. т, 11 %), Япония (1,4 тыс. т, 4,9 %) и США (1,2 тыс. т, 3,8 %);
- карбида вольфрама – Китай (43,4 тыс. т, 75 %), США (4,5 тыс. т, 7,8 %), Германия (1,0 тыс. т, 1,7 %) и Россия (0,9 тыс. т, 1,6 %).

На промышленность Китая в 2020 г. приходится 68 % производства ферровольфрама, 57 % металличе-

ского вольфрама и 75 % карбида вольфрама. Поэтому в динамике мировых товарных потоков всех вольфрамовых продуктов отчетливо отмечается ведущая роль китайской продукции (таблица).

**Таблица.** Темпы изменений объемов товарных потоков вольфрамовых продуктов за 1970–2020 гг., %/год

**Table.** Rate of change in the volume of commodity flows of tungsten products for 1970–2020, %/year

Территория Territory	Производство Production	Экспорт Export	Импорт Import	Потребление Consumption
Ферровольфрам/Ferrotungsten				
Мир/World	+1,2	+0,9	+1,3	+1,1
Китай/China	+2,7	+0,1	0,0	+4,8
Вольфрам металлический/Tungsten metal				
Мир/World	+0,8	+4,4	+5,6	+1,1
Китай/China	+3,8	+5,2	+0,8	+3,3
Карбид вольфрама/Tungsten carbide				
Мир/World	+2,3	+5,5	+6,8	+2,4
Китай/China	+6,2	+12,5	0,0	+5,5

Цвета обозначены позиции с темпами изменений +5...+10 % и более +10 %.

The color indicates positions with a rate of change of +5...+10 % and more than +10 %.

Динамика производных показателей изменения (прироста/спада) объемов мировых товарных потоков не критична только для ферровольфрама (менее  $\pm 5$  %/год), причем для Китая имеет место лишь небольшое увеличение значений прироста производства и потребления этого товарного продукта.

Для объемов мировых товарных потоков вольфрама металлического имеет место высокий показатель роста интенсивности импортного потока (+6,8 %/год) при отставании увеличения темпов экспорта. Это обусловлено как раз динамикой китайского рынка этого товарного продукта с высоким приращением его экспортного потока (+5,2 %/год).

Наибольшие изменения в динамике товарных потоков у карбида вольфрама: увеличение мирового экспорта (+5,5 %/год) и импорта (+6,8 %/год). Оно обусловлено увеличением производства (+6,2 %/год), потребления (+5,4 %/год) и, особенно, экспорта (+12,5 %/год) этого товарного продукта в Китае.

В целом во времени имеется системное увеличение роли международной торговли вольфрамом металлическим и, особенно, карбидом вольфрама, при незначительных темпах роста торговли ферровольфрамом.

В динамике международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами за последние 50 лет следует отметить следующие знаковые события и тенденции:

- исключительно резкое увеличение стоимости торговли всеми конечными вольфрамовыми продуктами за счет ценового фактора после 2002 г. вплоть до 2,9 млрд USD в 2008 г. (+32 %/год); особенно значительное увеличение стоимости имеет место для вольфрама металлического и карбида вольфрама;
- увеличение долей стоимости международной торговли всеми видами конечных вольфрамовых

продуктов от стоимости их производства с 20–40 % в 1991 г. до 70–100 % к 2001 г. в результате падения спроса на военную продукцию с использованием вольфрама и переориентации конечных вольфрамовых продуктов на другие приложения (в первую очередь – твердые сплавы); расширение в 1990–2010 гг. свободы торговли конечными вольфрамовыми продуктами между странами; увеличение объемов транзитной торговли конечными вольфрамовыми продуктами в 2000–2010-е гг.;

- снижение долей торговли ферровольфрамом от суммы стоимости торговли конечными вольфрамовыми продуктами (несмотря на увеличение объемов торговли) с 39 % в 1972 г. до 3–7 % в 2010-е гг.;
- преобладание спроса на карбид вольфрама в сумме конечных вольфрамовых продуктов приходится на период спада спроса на металлический вольфрам на военные приложения в 1992–2003 гг., причем в 1992–1997 гг. карбид вольфрама являлся лидером продаж среди вольфрамовых продуктов.

Вольфрам металлический большую часть времени анализируемого периода (кроме просадки в 1992–1997 гг.) остается главным товаром международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами по стоимости (37–72 % от емкости рынка), несмотря на меньшую долю физических объемов его продаж по сравнению с карбидом вольфрама, что обусловлено именно ценовым фактором.

В 2020 г. мировой экспорт конечных вольфрамовых продуктов составил 4,5 тыс. т ферровольфрама, 21,5 тыс. т вольфрама металлического и 21,8 тыс. т карбида вольфрама, а мировой импорт – 4,1 тыс. т FeW, 26,6 тыс. т вольфрама металлического и 24,0 тыс. т WC.

Главными экспортерами конечных вольфрамовых продуктов являются: для ферровольфрама в 1970–1979 гг. – Британия, 40–83 % от мирового спроса, 1980–2020 гг. – Китай 50–99 %, для вольфрама металлического – Китай (максимально до 20 %, в 2020 г. – 17 %), США (максимально до 25 %, в 2020 г. – 10 %) и Германия (до 20 %), для карбида вольфрама – Китай, нарастивший экспорт до 30–58 %.

Главными импортерами конечных вольфрамовых продуктов к настоящему времени являются: для ферровольфрама – Германия (55–94 % от национального потребления), Япония (100 %), Нидерланды (100 %) и Австрия (100 %), для вольфрама металлического – Германия (57–65 %) и США (38–44 %), для карбида вольфрама – Германия (54–78 %), Япония (59–80 %) и США (41–46 %). Все вышеперечисленные страны-импортеры являются промышленно развитыми, но выработавшими свои вольфрамовые месторождения и критически зависимыми от импорта и сырьевых, и конечных вольфрамовых продуктов.

Динамика суммарного производства и потребления конечных вольфрамовых продуктов (ферровольфрама, вольфрама металлического и карбида вольфрама), в принципе, конформно повторяет изменения объемов потребления сырьевых вольфрамовых продуктов и включает период слабого роста объемов с 39

тыс. т в 1971 г. до 64 тыс. т в 1990 г., период спада потребления в 1992–2003 гг. на уровне 41–53 тыс. т/год и период значительного роста начиная с 75 тыс. т в 2004 г. до 118 тыс. т в 2019 г. (в пересчете на 100 % W).

В 2020 г. мировое потребление вольфрамовых продуктов составило (в физическом весе): 15 тыс. т ферровольфрама, 32 тыс. т вольфрама металлического и 60 тыс. т карбида вольфрама.

Лидером потребления ферровольфрама в 1970–1980-е гг. являлся СССР (36–50 % мирового спроса) – в основном для производства танковой брони, но с 1993 г. наблюдается его снижение (3–7 %), сохраняемое до настоящего времени. Китай же, потребляя в 1970-х гг. 0,5–2,0 тыс. т/год (6–12 % мирового спроса) ферровольфрама, начиная с 1995 г. наращивает его потребление вплоть до 10,7 тыс. т (69 % мирового спроса) в 2019 г. Стабильное потребление ферровольфрама за весь исследуемый период имеет место в Японии, США и Австрии. Выросло потребление этого продукта в Германии, сократилось во Франции, Швеции и Британии.

Лидером потребления металлического вольфрама, как и для ферровольфрама, в 1970–1980-е гг. являлся СССР (15–29 % мирового спроса), но с 1993 г. в результате стагнации промышленного производства наблюдается его снижение (2–8 %). Китай, потребляя в 1970-х гг. 2,1–4,2 тыс. т/год (9–17 % мирового спроса) вольфрама металлического, начиная с 1983 г. наращивает его использование вплоть до 17,4 тыс. т (66 %) в 2009 г., а в 2010-е гг. сохраняет высокий уровень потребления этого продукта – 13,5–19,4 тыс. т/год (35–53 % мирового потребления). Стабильно потребление металлического вольфрама в США и Австрии. Увеличивается потребление этого продукта в Германии. Следует отметить значительное увеличение спроса на металлический вольфрам в 2010-е гг. в остальных странах мира – до 10–12 тыс. т/год, когда ранее они потребляли не более 1–2 тыс. т/год.

Как и в отношении ферровольфрама с вольфрамом металлическим, лидером потребления карбида вольфрама в 1970–1980-е гг. также являлся СССР (15–28 % мирового спроса), но с 1993 г. в результате стагнации промышленного производства и, в первую очередь, металлообработки наблюдается его снижение. Китай, потребляя в 1970-х гг. 1,7–3,5 тыс. т/год (10–14 % мирового спроса) карбида вольфрама, начиная с 1983 г. наращивает его использование, вплоть до 34,6 тыс. т (55 %) в 2014 г. Возрастает потребление карбида вольфрама в США, но с небольшими темпами прироста. Стабильно потребление этого товарного продукта в Японии и Австрии. Также следует отметить значительное увеличение спроса карбида вольфрама (как и в случае вольфрама металлического) в 2010-е гг. в остальных странах мира – до 10–22 тыс. т/год, хотя ранее они потребляли не более 1–4 тыс. т/год.

Цены на конечные вольфрамовые продукты, как и на вольфрамовое сырье, длительный период (до 2004 г.) испытывали обычное инфляционное увеличение (+0,3 %/год для ферровольфрама, +3,7 % для вольфрама металлического и +0,6 % для карбида вольфрама), за исключением всплесков повышения

цен в кризисный период после отмены золотого обеспечения доллара США в 1977–1981 гг. Примечательно также, что в 1983–1995 гг. цены на карбид вольфрама превышали цены на вольфрам металлический, что свидетельствует о повышении спроса на него до начала спада потребления вольфрамовых продуктов на производство военных приложений. В 2004–2008 гг. начался значительный рост цен на все конечные вольфрамовые продукты (+42 %/год для ферровольфрама, +15,2 % для вольфрама металлического и +26,4 % для карбида вольфрама) в результате бурного роста экономики Китая, сопровождавшегося резким увеличением их национального потребления. В дальнейшем наблюдается относительная стабилизация цен на конечные вольфрамовые продукты на достигнутых высоких уровнях. Были и локальные периоды просадки цен одновременно для всех вольфрамовых продуктов в 2009–2010 гг. (последствия всемирного финансового кризиса) и в 2015–2016 гг. (отклик на временное избыточное предложение вольфрамовых продуктов, в первую очередь из Китая).

Примечательно также, что изменения цены на ферровольфрам (учитываемый как конечный товарный продукт) за весь исследуемый период 1970–2020 гг. больше коррелирует с сырьевыми вольфрамовыми продуктами (и ближе к ним по уровню цен), чем с ценами на конечные товары (вольфрам металлический и карбид вольфрама).

Цены на конечные вольфрамовые продукты (в физическом весе) составили в 2020 г. для ферровольфрама 11,0 USD/кг, для вольфрама металлического – 67,1 USD/кг и для карбида вольфрама – 43,1 USD/кг.

Динамика оцененной стоимости производимых в мире конечных вольфрамовых продуктов, в принципе, повторяет динамику изменений цен на вольфрамовые продукты с периодами повышения в 1973–1985 гг. (до 2,0 млрд USD/год) и в 2004–2020 гг. (до 6,4 млрд USD/год), а также снижение в период провала спроса в 1993–2002 гг. (0,6–1,1 млрд USD/год). При этом стоимость конечных вольфрамовых продуктов в течение всего периода превышает стоимость производства сырьевых вольфрамовых продуктов в 2–4 раза, что определяется выгодностью торговли товарами с большей прибавочной стоимостью.

В динамике суммарной стоимости международной торговли конечными вольфрамовыми продуктами наблюдается три локальных периода изменений, не совпадающих с изменениями динамики стоимости их мирового производства: тренд роста в 1970–1990-е гг. (до 588 млн USD в 2002 г.; исключительно резкое увеличение стоимости при ажиотажном спросе после 2002 г. вплоть до 2,9 млрд USD в 2008 г. и колебаний стоимости в последующий период с подъемами до 3,6 млрд USD., а также с просадками до 2,1 млрд USD). Начиная с 1990 г. рынок мировой торговли вольфрамовыми продуктами перестает быть сырьевым, в нем по стоимости начинают преобладать конечные вольфрамовые товары. Лидируют по стоимости продажи вольфрама металлического, а по объемам – поставки карбида вольфрама.

Китай доминирует в мировом производстве, переработке и потреблении конечных вольфрамовых продуктов, и его новая торговая политика по сдерживанию (квотированию) экспорта этих товаров, по сути дела, определяет динамику мирового рынка вольфрамовых продуктов. Китай поставляет на мировой рынок до 99 % ферровольфрама, до 20 % вольфрама металлического и до 58 % карбида вольфрама, причем темпы роста экспорта последнего продукта только возрастают. Другие промышленно развитые страны-потребители конечных вольфрамовых продуктов – США, страны Европейского Союза и Япония – стали зависимыми от импорта вольфрамовых продуктов и будут продолжать оставаться такими в обозримом будущем. Доли мировой торговли конечными вольфрамовыми продуктами от стоимости их мирового производства достаточно высоки, но имеется тенденция их снижения с 82 % в 2006 г. до 55 % в 2020 г. Доли же стоимости конечных вольфрамовых продуктов в мировой торговле суммы всех вольфрамовых продуктов составляли 20–30 % в 1970–1980-е гг., начали увеличиваться в 1989 г., превысив 50 % в 1993 г., и колеблются в диапазоне 50–65 % в 2000–2010-е гг.

Политические противостояния в мире влияют на рынок конечных вольфрамовых продуктов. События

2022 г. могут привести к значительному увеличению спроса на вольфрамовые продукты в производстве военных изделий. Уже появляются ограничения в международной торговле отходами и ломом вольфрама [26, 27]. Возможны и другие ограничения международной торговли сырьевыми вольфрамовыми продуктами отдельными странами и их группами в результате давления политических санкций и их последствий. Из развитых промышленных стран относительно самодостаточно в обеспечении производства конечных вольфрамовых продуктов собственным сырьем только Китай и Россия. В ограниченных масштабах возможно возобновление собственной добычи вольфрамового сырья путем реанимации старых производств в США, Англии, Франции, Австрии и Южной Корее. Наиболее проблемно обстоит обеспечение сырьем вольфрамовых производств в Германии и Японии, не имеющих собственных добывающих производств. Поэтому риски обеспечения поставок вольфрамовых продуктов их потребителям во многих странах только возрастают.

*Статья написана в рамках выполнения гранта Российской государственной академии наук на 2022–2023 гг. по теме «Критические минеральные продукты в российском и мировом хозяйстве» (проект № 22-28-01742).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Oehman B. Tungsten supply and demand / Tungsten: 1990. Proc. of the 5th International tungsten symposium. – Ramsar, Iran, 14–18 October 1990. – Code 15251. – P. 26–39.
- Zafirov B. The strategic challenges on world tungsten market // International journal on information technologies and security. – 2010. – № 3. – P. 69–80.
- Werner A.B.T., Sinclair W.D., Amey E.B. International strategic mineral issues summary report. Tungsten. U.S. Geological survey. – 2014. – 86 p. URL: <https://pubs.usgs.gov/circ/0930/o/pdf/c930-o.pdf> (дата обращения: 09.09.2022).
- Global tungsten demand and supply forecast / J. Dvořáček, R. Sousedíková, T. Vrátný, Z. Jureková // Archives of mining sciences. – 2017. – V. 62. – № 1. – P. 3–12.
- Хатьков В.Ю., Боярко Г.Ю. Современное состояние вольфрамовой промышленности России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 124–137. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/114.
- International market power analysis of China's tungsten export market – from the perspective of tungsten export policies / X. Zhu, X. Li, H. Zhang, J. Huang // Resources policy. – 2019. – V. 61. – P. 643–652. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.11.005.
- Xi-Jie C., Li-Qiong J. China raised the first batch production quota over rare-earths and tungsten in 2021 // China geology. – 2021. – V. 4. – № 1. – P. 193–194. DOI: 10.31035/cg2021031.
- Review of tungsten resource reserves, tungsten concentrate production and tungsten beneficiation technology in China / X. Wang, W.-Q. Qin, F. Jiao, L.-Y. Dong, J.-G. Guo, J. Zhang, C.-R. Yang // Transactions of nonferrous metals society of China. – 2022. – V. 32. – № 7. – P. 2318–2338. DOI: 10.1016/S1003-6326(22)65950-8.
- Геологическая служба Британии (BGS). URL: [Commodities & statistics | MineralsUK \(bgs.ac.uk\)](https://commodities&statistics|MineralsUK(bgs.ac.uk)) (дата обращения 09.09.2022).
- Геологическая служба США (U.S. Geological Survey). URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs> (дата обращения 09.09.2022).
- TrendEconomy. URL: [TrendEconomy](https://trendeconomy.com/) - Портал открытых данных (дата обращения: 09.09.2022).
- Исследовательская группа «Инфомайн». URL: <https://infomine.ru/> (дата обращения 09.09.2022).
- A world of information. UNdata. URL: [UNdata](https://data.un.org/) (дата обращения: 09.09.2022).
- Государственные доклады «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». 2000–2020 гг. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения 09.09.2022).
- Таможенная статистика внешней торговли РФ: анализ данных. Федеральная таможенная служба. URL: [stat.customs.gov.ru/analysis](https://stat.customs.gov.ru/analysis/) (дата обращения 09.09.2022).
- Extraction of ferrotungsten from ores with low WO<sub>3</sub> content / N. Golovchenko, O. Bairakova, S. Aknazarov, G. Ksandopulo, A. Mukasyan // International journal of self-propagating high-temperature synthesis. – 2012. – V. 21. – № 3. – P. 156–161. DOI: 10.3103/S1061386212030041.
- Gasik M. Technology of tungsten ferroalloys // Handbook of ferroalloys. Theory and technology. – Butterworth-Heinemann is an Imprint of Elsevier, 2013. – P. 377–385. DOI: 10.1016/B978-0-08-097753-9.00011-3.
- Komarov O.N., Zhilin S.G. Formation of alloy chemical composition produced by aluminothermy on alloying with tungsten extracted from scheelite concentrate // Metallurgist. – 2022. – V. 65. – № 9–10. – P. 995–1007. DOI: 10.1007/s11015-022-01240-2.
- Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets. – Luxembourg: Publications office of the European Union, 2017. – 515 p. URL: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (дата обращения 09.09.2022).
- Никонов В.Н. Вольфрам. Свойства, применение, производство, продукция. – 12 с. URL: [https://www.metotech.ru/articles/at\\_volfram\\_1.pdf](https://www.metotech.ru/articles/at_volfram_1.pdf) (дата обращения 09.09.2022).
- Malyshev V.V., Kushchevska N.F. Production of tungsten and tungsten carbide powders // Powder metallurgy and metal ceramics. – 2019. – V. 58. – № 3–4. – P. 237–242. DOI: 10.1007/s11106-019-00069-w.
- Electrochemical production of tungsten powders from tungsten hard metal waste / G.G. Tulskij, L.V. Liashok, M.P. Osmanova, I.N. Kolupaev // Powder metallurgy and metal ceramics. – 2020. – V. 58. – № 9–10. – P. 499–502. DOI: 10.1007/s11106-020-00102-3.
- Plasma synthesis of tungsten carbide nanopowder from ammonium paratungstate / T. Ryu, H.Y. Sohn, K.S. Hwang, Z.Z. Fang // Journal of the American ceramic society. – 2009. – V. 92. – № 3. – P. 655–660. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.02961.x.

24. Balakhonov D.I., Makarov I.A. Plasma-chemical synthesis of tungsten carbides from multicomponent oxide-containing concentrates // *Russian metallurgy*. – 2020. – № 8. – P. 870–876. DOI: 10.1134/S0036029520080029.
25. Focus on some aspects of market price trends for tungsten / J. Dvořáček, R. Sousedíková, A. Krzemien, A.S. Sanchez // *Acta montanistica Slovaca*. – 2017. – V. 22. – № 2. – P. 126–135.
26. Перечень товаров, которые являются существенно важными для внутреннего рынка Евразийского экономического союза и в отношении которых в исключительных случаях могут быть введены временные запреты или количественные ограничения экспорта / Утв. Решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 26.07.2016 N 83 (ред. от 31.03.2020).
27. Постановление Правительства РФ от 09.03.2022 N 313 (ред. от 27.08.2022). «О мерах по реализации Указа Президента Российской Федерации от 8 марта 2022 г. N 100» // *Собрание законодательства РФ*, 21.03.2022, N 12, ст. 1819.

*Поступила: 31.10.2022 г.*

*Прошла рецензирование: 23.03.2023 г.*

#### **Информация об авторе**

**Боярко Григорий Юрьевич**, доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, Отделение нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 339.13:669.27:669.018.25

## OVERVIEW OF THE GLOBAL TUNGSTEN MARKET. PART 3. COMMODITY FLOWS OF FINAL TUNGSTEN PRODUCTS

Grigory Yu. Boyarko<sup>1</sup>,  
gub@tpu.ru

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

**The relevance** of the work is caused by the need to study the problems of quite volatile global market of final tungsten products.

**Objective:** to study the dynamics of global commodity flows (production, import, export, consumption) of final tungsten products (ferrotungsten, tungsten metal, tungsten carbide); to assess the criticality of the world market of tungsten products.

**Methods:** statistical, graphical, logical.

**Results.** The global market of final tungsten products is quite complex. The world production of final tungsten products increased from 42–52 kt 100 % W/year in the 70s of the XX century to 100–119 kt 100 % W/year in the 10s of the XXI century with an increase rate of +2,2 %/year over a 50-year period. In 1970–1980, there was a period of the usual low-growth global consumption of final tungsten products with a growth rate of their demand +1,9 %/year. There was a strong decrease in demand for tungsten products (–4,9 %/year) in the military sphere (the end of the Cold War) and reducing the role of Russia in the tungsten market (the consequences of stagnation of the Russian economy, primarily metalworking) in the 1990s. In the 2000–2010s, there was a rapid growth in global demand for final tungsten commodity products, tungsten carbide, due to the exponential increase in the capabilities of the Chinese industry. The growth rate of global demand for final tungsten products during this period amounted to +6,7 %/year. China dominates in the global production, consumption and trade of final tungsten products, so its trade policy of deterrence export quotation of these goods sets the dynamics of the global tungsten market. By 2020, China is the leader in the production of final tungsten products: 68 % of the world ferrotungsten supply, 57 % of tungsten metal and 75 % of tungsten carbide. Most of these commodity products remain in China and go to national consumption: 69 % of the global demand for ferrotungsten, 53 % of tungsten metal and 55 % of tungsten carbide. Since 1990s, the world trade market of tungsten product ceases to be a raw material, and final tungsten products begin to prevail on it. The shares of the value of final tungsten products in world trade totals of all tungsten products were 20–30 % in the 1970–1980s, began to increase in 1989, exceeding 50 % in 1993 and fluctuates in the range of 45–65 % in the 2000–2010s. Top exporters to date are: for ferrotungsten – China, for metal tungsten – China, the USA and Germany, for tungsten carbide – China. Top importers for ferrotungsten are Germany, Japan, Netherlands and Austria, for metal tungsten – Germany and USA, for tungsten carbide – Germany, Japan and USA. Most of the industrialized countries such as the USA, European Union countries and Japan, which are consumers of final tungsten products have become dependent on imports of tungsten products and will continue to remain so in the foreseeable future.

### Key words:

Ferrotungsten, metal tungsten, tungsten carbide, production, export, import, consumption, pricing.

The article was written as part of the grant from the Russian Science Foundation for 2022–2023 on the topic «Critical Mineral Products in the Russian and World Economy» (project No. 22-28-01742).

### REFERENCES

- Oehman B. Tungsten supply and demand. *Tungsten: 1990. Proc. of the 5<sup>th</sup> International tungsten symposium*. Ramsar, Iran, 14–18 October 1990. Code 15251, pp. 26–39.
- Zafirov B. The strategic challenges on world tungsten market. *International journal on information technologies and security*, 2010, no. 3, pp. 69–80.
- Werner A.B.T., Sinclair W.D., Amey E.B. *International strategic mineral issues summary report. Tungsten*. U.S. Geological survey, 2014. 86 p. Available at: <https://pubs.usgs.gov/circ/0930/o/pdf/c930-o.pdf> (accessed 9 September 2022).
- Dvořáček J., Sousedíková R., Vrátný T., Jureková Z. Global tungsten demand and supply forecast. *Archives of mining sciences*, 2017, vol. 62, no 1, pp. 3–12.
- Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu. Current state of tungsten industry in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 124–137. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/114.
- Zhu X., Li X., Zhang H., Huang J. International market power analysis of China's tungsten export market – from the perspective of tungsten export policies. *Resources policy*, 2019, vol. 61, pp. 643–652. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.11.005.
- Xi-Jie C., Li-Qiong J. China raised the first batch production quota over rare-earths and tungsten in 2021. *China geology*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 193–194. DOI: 10.31035/cg2021031.
- Wang X., Qin W.-Q., Jiao F., Dong L.-Y., Guo J.-G., Zhang J., Yang C.-R. Review of tungsten resource reserves, tungsten concentrate production and tungsten beneficiation technology in China. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 2022, vol. 32, no. 7, pp. 2318–2338. DOI: 10.1016/S1003-6326(22)65950-8.
- British geological survey*. Available at: Commodities & statistics | MineralsUK (bgs.ac.uk) (accessed 9 September 2022).
- U.S. Geological Survey*. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs> (accessed 9 September 2022).
- Trend Economy*. Available at: TrendEconomy - Портал открытых данных (accessed 9 September 2022).
- InfoMine research group*. Available at: <https://infomine.ru/> (accessed 9 September 2022).
- A world of information*. UNdata. Available at: UNdata (accessed 9 September 2022).
- Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2000–2020 godu»* [State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2000–2020»] [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvenny\\_e\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvenny_e_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (accessed 9 September 2022).
- Data on customs statistics of foreign trade of the Russian Federation*. Federal State Statistics Service. Available at: [stat.customs.gov.ru/analysis](http://stat.customs.gov.ru/analysis) (accessed 9 September 2022).

16. Golovchenko N., Bairakova O., Aknazarov S., Ksandopulo G., Mukasyan A. Extraction of ferrotungsten from ores with low WO<sub>3</sub> content. *International journal of self-propagating high-temperature synthesis*, 2012, vol. 21, no. 3, pp. 156–161. DOI: 10.3103/S1061386212030041.
17. Gasik M. *Technology of tungsten ferroalloys. Handbook of ferroalloys. Theory and technology*. Butterworth-Heinemann is an Imprint of Elsevier, 2013, pp. 377–385. DOI: 10.1016/B978-0-08-097753-9.00011-3.
18. Komarov O.N., Zhilin S.G. Formation of alloy chemical composition produced by aluminothermy on alloying with tungsten extracted from scheelite concentrate. *Metallurgist*, 2022, vol. 65, no. 9–10, pp. 995–1007. DOI: 10.1007/s11015-022-01240-2.
19. *Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets*. Luxembourg: Publications office of the European Union, 2017, 515 p. Available at: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1> (accessed 9 September 2022).
20. Nikonov V.N. *Volfram. Svoystva, primeneniye, proizvodstvo, produktsiya* [Wolfram. Properties, application, production, products]. 12 p. Available at: [https://www.metotech.ru/articles/at\\_volfram\\_1.pdf](https://www.metotech.ru/articles/at_volfram_1.pdf) (accessed 9 September 2022).
21. Malyshev V.V., Kushchevskaya N.F. Production of tungsten and tungsten carbide powders. *Powder metallurgy and metal ceramics*, 2019, vol. 58, no. 3–4, pp. 237–242. DOI: 10.1007/s11106-019-00069-w.
22. Tulsikij G.G., Liashok L.V., Osmanova M.P., Kolupaev I.N. Electrochemical production of tungsten powders from tungsten hard-metal waste. *Powder metallurgy and metal ceramics*, 2020, vol. 58, no. 9–10, pp. 499–502. DOI: 10.1007/s11106-020-00102-3.
23. Ryu T., Sohn H.Y., Hwang K.S., Fang Z.Z. Plasma synthesis of tungsten carbide nanopowder from ammonium paratungstate. *Journal of the American ceramic society*, 2009, vol. 92, no. 3, pp. 655–660. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.02961.x.
24. Balakhonov D.I., Makarov I.A. Plasma-chemical synthesis of tungsten carbides from multicomponent oxide-containing concentrates. *Russian metallurgy*, 2020, no. 8, pp. 870–876. DOI: 10.1134/S0036029520080029.
25. Dvořáček J., Sousediková R., Krzemien A., Sanchez A.S. Focus on some aspects of market price trends for tungsten. *Acta montanistica Slovaca*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 126–135.
26. Reshenie Kollegii Evraziyskoy ekonomicheskoy komissii. *Perechen tovarov, kotorye yavlyayutsya sushchestvenno vazhnymi dlya vnutrennego rynka Evraziyskogo ekonomicheskogo soyuza i v otnoshenii kotorykh v isklyuchitelnykh sluchayakh mogut byt vvedeny vremennyye zaprety ili kolichestvennyye ogranicheniya eksporta* [The list of goods that are essential for the internal market of the Eurasian Economic Union and in respect of which, in exceptional cases, temporary bans or quantitative export restrictions may be imposed]. Approved by the Decision of the Board of the Eurasian Economic Commission of 07/26/2016, no. 83 (ed. of 03/31/2020).
27. Postanovlenie Pravitelstva RF. «O merakh po realizatsii Ukaza Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 8 marta 2022 g, no. 100» [Resolution of the Government of the Russian Federation of 03/09/2022, no. 313 (ed. of 08/27/2022)]. «On measures to implement the Decree of the President of the Russian Federation of March 8, 2022, no. 100». *Collection of Legislation of the Russian Federation*, 03/21/2022, no. 12, article 1819.

Received: 31 October 2022.

Reviewed: 23 March 2023.

#### Information about the author

Grigory Yu. Boyarko, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.064

## ОСОБЕННОСТИ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС ПРОМЫШЛЕННОГО КАНАЛА СТОЧНЫХ ВОД

Ушакова Евгения Сергеевна<sup>1</sup>,  
ushakova.evgeniya@gmail.com

Белкин Павел Андреевич<sup>1</sup>,  
pashabelkin@mail.ru

Дробинина Елена Викторовна<sup>1</sup>,  
alenadrobiniina@yandex.ru

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

**Актуальность** исследования определяется необходимостью получения исходных данных для безопасного обращения с осадками, формирующимися в результате отстаивания сточных вод различного генезиса в крупном промышленном центре Западного Урала.

**Цель** настоящей работы заключается в характеристике химизма сточных вод промышленного канала и формируемых ими осадков, а также в определении экологического статуса и возможных вариантов обращения с осадками сточных вод.

**Объектом** исследования является промышленный канал, или канал транспорта сточных вод, г. Березники (Пермский край, Россия). Канал представляет собой искусственный водоток общей протяженностью 8,9 км. Он сформирован в середине прошлого века с целью защиты промышленной зоны г. Березники от подтопления и организации единой городской промышленной канализации. На современном этапе канал принимает в себя промышленные сточные воды ряда предприятий, а также сточные воды городских очистных сооружений и ливневые стоки. В устье канала действует станция очистки, после которой очищенные воды поступают в Камское водохранилище.

**Методы** исследования включают в себя определение макро- и микроэлементного состава сточных вод канала и его осадка с применением капиллярного электрофореза совместно с масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Вместе с этим изучены микробиологические и радиологические показатели состояния осадка с применением установленных природоохранным законодательством РФ методик, проведено биотестирование проб осадка. Оценка геохимического состояния осадка и возможных экотоксикологических последствий от его загрязнения реализована с применением международных интегральных показателей, таких как индекс потенциального экологического риска, индекс геоаккумуляции, коэффициент качества осадка.

**Результаты.** Выполнена оценка уровня загрязнения сточных вод и осадка с использованием нормативных показателей и геохимических индексов. Изученные образцы осадка характеризуются умеренным содержанием токсичных элементов, безопасны в радиационном отношении и не проявляют признаков бактериального загрязнения. При этом уровень загрязнения осадка значительно возрастает к нижней части промканала. Осадки в нижней части промканала (перед очистными сооружениями) значительно обогащены всеми исследованными микроэлементами по сравнению с их средним содержанием в верхней части континентальной коры. Установлено, что уровень загрязнения осадка по Igeo в промканале изменяется от сильнозагрязненного до экстремально загрязненного. Наибольшие значения индекса геоаккумуляции (Igeo > 1000) зафиксированы в нижней части промканала. Значения индекса потенциального экологического риска в промканале изменяются от низкого до умеренного. Среднее значение коэффициента качества осадка показывает сильное загрязнение осадка в нижнем течении, при этом в среднем течении осадок сточных вод относится к категории незагрязненных. Проведен сравнительный анализ международных стандартов допустимых уровней содержания тяжелых металлов в осадках сточных вод для сельскохозяйственного использования. Проведена оценка возможных направлений использования осадков сточных вод, накопленных в промышленном канале города Березники. Наличие экстремально высоких концентраций хлоридов и микроэлементов в осадке сточных вод ограничивает его повторное использование. Это определяет необходимость дальнейшего поиска экологически безопасных способов применения и утилизации накопленного осадка. Перспективным направлением рециклинга накопленного осадка из промканала города Березники может стать разработка технологий производства строительных материалов.

### Ключевые слова:

сточные воды, осадок сточных вод, токсичные микроэлементы, хлоридное загрязнение, промышленный канал, Верхнекамское месторождение.

### Введение

Образование значительного объема соленых сточных вод обычно связано с деятельностью промышленных предприятий химической, фармацевтической и горнодобывающих отраслей, а также сельскохозяйственных и аквакультурных производств [1]. В частности, концентрация хлоридов в сточных водах нефтепромыслов может составлять 102 г/л [2], а содержание растворенных солей (по NaCl) в стоках за-

вода по производству вяленой соленой рыбы достигает 46 г/л [3]. Высокая миграционная способность хлорид-ионов в водной среде определяет возможность хлоридного засоления подземных вод. Так, в районе расположения прудов-отстойников предприятия по производству кальцинированной соды «Яникосода» (Польша), в которые поступают стоки с содержанием хлоридов до 200 г/л, зафиксирован рост концентрации хлорид-ионов в подземных водах до 16,5 г/л [4].

Сброс высокоминерализованных сточных вод хлоридного состава в природные объекты без должной очистки может привести к серьезному загрязнению окружающей среды и нанести ущерб водным, наземным и водно-болотным экосистемам [5, 6]. Закономерно, что наиболее актуальной проблемой является при добыче и переработке высокорастворимых полезных ископаемых, в частности месторождений солей. Так, засоление земель и пресноводных экосистем в результате производственных процессов разработки месторождения калийных солей зафиксировано в Тюрингии (Германия). Крупнейшая водная артерия региона – река Верра – десятилетиями являлась приемником высокоминерализованных сточных вод. Концентрация хлорид-ионов в речных водах ниже выпусков сточных вод в периоды наиболее интенсивных выпусков достигала 30 г/л, суммарное содержание растворенных солей превышало 50 г/л. В результате в течение длительного времени соленость нижнего течения р. Верры превышала соленость Северного моря [7, 8]. Засоление реки привело к снижению биоразнообразия и серьезным изменениям в составе водных сообществ [9, 10].

Крупнейшее в РФ Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей расположено в северной части Прикамья и является центром индустриального развития региона. На месторождении с 1930-х гг. осуществляется добыча сильвинита и карналлита. Сильвинит является сырьем для производства калийных удобрений, карналлит применяется в магниевой промышленности, насыщенные хлоридные рассолы применяют для производства кальцинированной соды, а также в различных технологических циклах предприятий химической промышленности Соликамско-Березниковской промышленной агломерации [11]. При производстве химической продукции образуется большое количество отходов. Так, например, при производстве одной тонны кальцинированной соды образуется около 10 м<sup>3</sup> жидкости, содержащей около 1 т хлоридов, 200 кг натрия и порядка 400 кг кальция [12].

Характерной особенностью водоотведения в городах Верхнекамья является поступление сточных вод от водопользователей до Камского водохранилища по системам малых водотоков [13]. Ярким примером техногенного воздействия на малые реки (рр. Толыч, Быгель, Зырянка) в г. Березники за счет точечных декларируемых и не декларируемых (диффузных) источников загрязнения является снижение качества вод по данным изучения абиотических и биотических показателей [14].

Для снижения техногенного воздействия на малые реки предпочтительным решением по очистке таких вод является централизованная схема со сбором большого объема стоков с разных предприятий на единых очистных сооружениях. Таким образом существенно снижаются издержки на дорогостоящую инфраструктуру, которая требует квалифицированного инженерного управления для обеспечения эффективной работы [15]. Примером такого решения является уникальный промышленный канал (промканал) от-

крытого типа, расположенный в городе Березники (в 180 км к северу от Перми – 59°24' с.ш., 56°45' в.д.), в который поступают промышленные стоки нескольких предприятий, а также коммунальные стоки и ливневые воды.

Учитывая продолжительность эксплуатации Березниковского промканала, насчитывающую несколько десятков лет, разнообразие поступающих в него стоков, большую массу накопленного осадка, цель настоящей работы заключается в характеристике химизма сточных вод промышленного канала и формируемых ими осадков, а также в определении экологического статуса и возможных вариантов обращения с осадками сточных вод. В задачи исследования входили характеристика химического состава сточных вод и их осадков на различных участках канала, санитарно-гигиеническая оценка осадков сточных вод и анализ возможностей использования или утилизации осадка сточных вод по результатам обобщения отечественного и зарубежного опыта.

#### Объект и методы исследования

Город Березники расположен в северной части Пермского края, является крупным центром химической и горнодобывающей промышленности Западного Урала. В настоящее время обширная промышленная зона г. Березники располагается в левобережной части р. Камы (верховье Камского водохранилища), в 1,5–2 км к северу и западу от городской застройки.

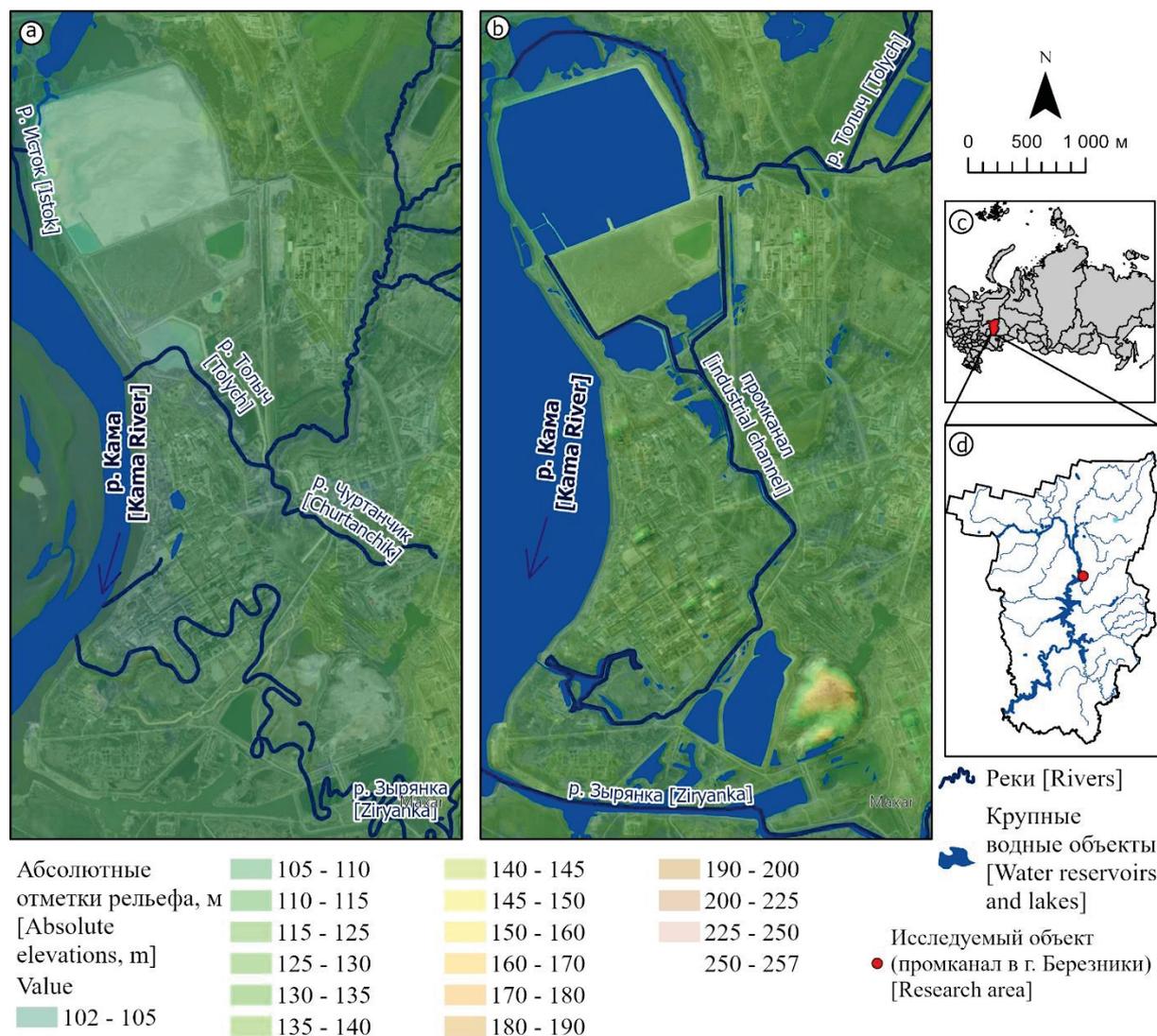
Предприятия западной части Березниковского промузла связывает промышленный канал, куда осуществляется сброс сточных вод ряда крупных промышленных предприятий. Образование этого канала связано с подъемом уровня воды р. Камы при строительстве Камской ГЭС, строительством защитной дамбы и последовавшей за ними перепланировкой территории.

Левобережье р. Камы в пределах современной территории промзоны г. Березники исторически характеризовалось низкими гипсометрическими отметками и заболоченностью. Населенные пункты Ленва, Усть-Зырянка, Дедюхино, располагавшиеся на левом берегу р. Камы до 1950-х гг., в период половодья частично затапливались и оказывались отрезанными от «большой земли» [16]. Так, для строительства Березниковского химического комбината (комплекс из азотно-тукового и содового производств, ТЭЦ), развернувшегося в 1929 г., были осуществлены мероприятия по подсыпке территории с подъемом поверхности на 2–4 м и устройству свайных полей.

Наиболее значительные изменения гидрографическая сеть левобережья Камы (рр. Зырянка, Толыч, Чуртанка и Исток) в районе города Березники претерпела при наполнении Камского водохранилища, стартовавшем в октябре 1953 г. [17]. Проектируемая отметка нормального подпорного уровня создаваемого водохранилища (108,5 м) превышала гипсометрические отметки рельефа изучаемой территории. С целью сохранения существовавших промышленных предприятий, расположенных вдоль береговой линии р. Камы, в рамках защитных мероприятий при строи-

тельстве Камской ГЭС была возведена ограждающая дамба. Эта дамба перекрыла устья рек Толыч и Зырянка. Таким образом новое устье р. Зырянки было вынесено за пределы сооружения (на 1 км южнее), а в старом, закрытом дамбой, была обустроена перекачивающая станция. Кроме того, старое русло р. Зырянки было объединено с руслом р. Толыч. В образовавшийся в результате объединения канал был организован сброс сточных вод прилегающих предприятий.

Направление верхнего и среднего течения р. Толыч впоследствии также было изменено в связи со строительством производственных объектов Березниковского содового завода (1960–1970-е гг.). Описанная схема сбора и отвода сточных вод действует на территории и в современный период (рис. 1). Таким образом, на протяжении уже нескольких десятков лет промканал выполняет роль транспортной артерии для сточных вод промышленного происхождения.



**Рис. 1.** Структура гидросети изучаемой территории до (а) и после (б) наполнения Камского водохранилища; с, d – обзорная карта расположения изучаемого объекта

**Fig. 1.** Structure of the hydrological system of the study area before (a) and after (b) the filling of the Kama reservoir; c, d – overview map of the research area

В настоящее время в промканал поступают промышленные сточные воды с производственных предприятий химической и металлургической отраслей. Промышленные сточные воды в верхнем и среднем течении канала (№№ 1–5, рис. 2) поступают с предприятий по производству минеральных удобрений, кальцинированной соды, основной химии (щелочей, кислот) и титаномагниевого производства, использующих в технологических процессах руду и рассолы Верхнекамского месторождения. Ведущими раство-

ренными в этих стоках веществами являются хлориды и сульфаты калия, натрия, кальция, магния, а также соединения тяжелых металлов [18–23]. В нижнем течении в канал поступают промышленные стоки с предприятия азотной промышленности (№№ 6, 7), а также коммунальные сточные воды г. Березники после очистки на городских очистных сооружениях, в связи с чем состав сточных вод закономерно обогащается соединениями азота, а также органическими веществами.

Вместе с этим, поскольку промканал является открытым, в него попадают атмосферные осадки и ливневые стоки с площади водосбора около 100 км<sup>2</sup>. Поступление и смешивание вод различного генезиса, в

том числе насыщенных взвешенными веществами, приводит к накоплению в канале донного осадка. Схема поступления сточных вод в канал приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Современное расположение промканала г. Березники, положение точек поступления сточных вод и точек отбора проб; T1, T3 – фото точек опробования в коллекторах сбора сточных вод с прилегающей к каналу территории; T2, T4 – фото точек опробования в канале

**Fig. 2.** Current location of the Berezniki industrial channel, location of wastewater intake points and sampling points; T1, T3 – photo of sampling points in wastewater collectors from the territory adjacent to the channel; T2, T4 – photo of sampling points in the channel

Следует отметить, что промканал не является природным водным объектом, в связи с этим к составу вод в нем не применяются рыбохозяйственные и гигиенические нормативы. Нормирование и контроль состава вод осуществляется в водоприёмнике сточных вод – Камском водохранилище, куда они поступают после очистки на специализированных сооружениях (рис. 2). Вместе с этим промышленный канал открытого типа не является изолированным от внешней среды, а значительная часть его русла располо-

жена на общедоступной территории за пределами производственных площадок.

В настоящем исследовании проанализирован состав сточных вод и осадков сточных вод (ОСВ) на четырёх участках: в среднем и нижнем течении промышленного канала (точки опробования T2 и T4), а также в правом и левом притоках промканала, представляющих собой коллекторы сбора сточных и ливневых вод с прилегающих территорий (точки опробования T1 и T3) (рис. 2). Точка опробования T3 распо-

ложена на участке прежнего русла р. Толыч, по которому происходил сток до техногенных преобразований изучаемого участка (рис. 1). Принятая схема расположения участков опробования выбрана с целью характеристики изменений состава сточных вод и ОСВ в среднем и нижнем течении канала, а также оценки влияния ливневых вод с водосборной площади канала. Опробование производилось на общедоступных участках, за пределами производственных площадок действующих предприятий.

Полевые исследования на акватории промканала проводили в конце августа 2019 г. Отбор проб сточных вод и ОСВ на каждом участке выполнялся единовременно. Пробы сточных вод отбирали непосредственно из потока с глубины не менее 0,3–0,5 м. Для отбора проб сточных вод применяли химически инертную тару из полимерных материалов и непрозрачного стекла. Отбор проб осадка проводили в зонах его наибольшей аккумуляции из поверхностного слоя 0–5 см с применением пластиковых совков и размещали в таре из полимерных материалов. Все пробы после отбора были этикетированы и помещены в изотермические сумки для транспортировки в лабораторию при температуре 4–5 °С. Значение водородного показателя рН сточных вод определяли *in situ* с применением портативного рН-метра рН-410 (НПК Аквилон, Россия).

Химический анализ отобранных проб проводился в аккредитованных лабораториях г. Перми и г. Березники. Потенциометрическим методом определяли рН проб осадка, методом титрования, в соответствии с ГОСТ 31957-2012, определяли гидрокарбонаты, катионно-анионный состав сточных вод и осадков устанавливали методом капиллярного электрофореза с использованием прибора Капель-104 (Эконикс-Эксперт, Россия). Валовое содержание микроэлементов в пробах осадков определялось масс-спектральным методом с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе AURORA M90 (Bruker, ФРГ). Для гамма-спектрометрического анализа использовался прибор Прогресс (Россия). Гравиметрическим методом определяли зольность осадков сточных вод в соответствии с ПНД Ф 16.2.2.2.3.3.29-02. Содержание органических соединений было проанализировано методами ИК-спектрометрии, ВЭЖХ и ГХ-МС. Экотоксикологическая оценка осадков произведена по изменению подвижности половых клеток млекопитающих *in vitro* ФР.1.31.2009.06301.

Вместе с исследованиями состава сточных вод и ОСВ для характеристики фоновых концентраций микроэлементов в депонирующих средах в районе г. Березники проведено опробование почвенного покрова. Фоновая площадка расположена в 1,5–2,5 км к югу от устья промышленного канала, на территории,

удаленной от крупных промышленных предприятий и покрытой условно-естественной растительностью (рис. 2). Почвенный покров представлен аллювиальными почвами легкого механического состава с щелочной реакцией среды. Отбор проб осуществляли методом конверта из верхнего горизонта (0–20 см). Лабораторное определение рН и валового содержания микроэлементов производили с применением методов анализа и приборной базы, аналогичных исследованиям ОСВ. Среднее арифметическое значение валовых концентраций микроэлементов в почвенном покрове было использовано в качестве местного фона.

Для сравнительной оценки обогащения осадков потенциально-токсичными элементами использован общепринятый механизм определения геохимической спецификации относительно эталона [24]. Оценка загрязнения осадка микроэлементами проводилась методом расчета *индекса потенциального экологического риска (Potential Ecological Risk Index, RI)*, предложенным Л. Хакансоном [25]. При оценке данным методом учитывается не только содержание тяжелых металлов в депонирующей среде, но и возможные негативные экотоксикологические последствия от загрязнения [26].

Индекс RI рассчитывается по следующей формуле:

$$RI = \sum E_r^i,$$

где  $E_r^i$  – коэффициент экологической опасности отдельного элемента. Расчет коэффициента экологической опасности производится по формуле:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i,$$

где  $T_r^i$  – коэффициент токсичности  $i$ -го элемента, приведен для исследуемых элементов в табл. 1 по данным [27–30], а  $C_f^i$  – коэффициент загрязнения этим элементом, также рассчитываемый по формуле:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i,$$

где  $C_s^i$  – фактическое содержание элемента в исследуемом образце осадка, а  $C_n^i$  – фоновое содержание  $i$ -го элемента. Фоновые концентрации приводятся в табл. 1 по данным исследований проб почвенного покрова фоновой территории (рис. 2). Применение фоновых концентраций почвенного покрова при расчете RI позволяет оценить степень загрязнения ОСВ промканала применительно к возможности внесения осадков в почвенный покров.

Классификация загрязнения токсичными элементами на основании индекса RI имеет следующие критерии оценки:  $RI < 150$  – низкий экологический риск;  $150 \leq RI < 300$  – умеренный экологический риск;  $300 \leq RI < 600$  – высокий экологический риск;  $RI \geq 600$  – экстремально высокий экологический риск.

**Таблица 1.** Значения коэффициентов токсичности  $T_r^i$  в депонирующих средах по данным [27–30] и средние концентрации микроэлементов в почвенном покрове фоновой территории  $C_n^i$ , мг/кг

**Table 1.** Values of toxic-response factor  $T_r^i$  [27–30] and background concentrations of trace elements in soils of the background area  $C_n^i$ , mg/kg

	Li	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Hg	Pb
$C_n^i$	7,1	15,11	2,36	5,7	11,6	27,1	1,3	0,96	126,83	0,31	0,08	0,33	0,24	136,28	0,23	0,91	9,6
$T_r^i$	0	2	5	5	5	1	10	0	1	2	30	2	7	1	1	40	5

Вместе с RI производится расчет *индекса геоаккумуляции* ( $I_{geo}$ ), предложенного Г. Мюллером [31].  $I_{geo}$  широко применяется для оценки уровня загрязнения микроэлементами депонирующих сред: донных отложений природных водоёмов, почв, осадков сточных вод [32, 33]. Использование индекса геоаккумуляции позволяет оценить уровень загрязнения ОСВ отдельными элементами в сравнении с их кларками [34]. Расчет индекса производится по формуле:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1,5B_n} \right),$$

где  $C_n$  – концентрация элемента в ОСВ;  $B_n$  – геохимическая фоновая концентрация, принятая в настоящей работе по среднему содержанию элементов в верхней части континентальной коры по данным К. Ведеполья [35]. Коэффициент 1,5 является поправочным коэффициентом, обусловленным литосферными факторами.

Классификация загрязнения микроэлементами по значению  $I_{geo}$  проводилась по семи градациям [36]: класс 0:  $I_{geo} \leq 0$  – практически незагрязненные; класс 1:  $0 < I_{geo} \leq 1$  – от незагрязненных до умеренно загрязненных; класс 2:  $1 < I_{geo} \leq 2$  – умеренно загрязненные; класс 3:  $2 < I_{geo} \leq 3$  – от умеренно до сильно загрязненных; класс 4:  $3 < I_{geo} \leq 4$  – сильно загрязненные; класс 5:  $4 < I_{geo} \leq 5$  – от сильно загрязненных до чрезмерно загрязненных; класс 6:  $5 < I_{geo}$  – чрезмерно загрязненные.

Оценка качества осадка проведена с помощью расчетного *коэффициента PECQ* (*Probable Effect Concentration Quality*), предложенного К. Инджерсоллем с соавторами [37]. Метод основан на сравнении концентраций веществ в исследуемых пробах (С) с концентрациями вероятного эффекта этих веществ на организмы (*PEC* – *Probable Effect Concentration*). Значения PEC были приняты по Д. Мак Дональду с соавторами [38] и составляли (в мг/кг): Zn=459; Cu=146; Pb=128; Cd=4,98; Ni= 48,6; Cr = 111; As=33. Коэффици-

циент PECQ был рассчитан для семи изученных микроэлементов по формуле:

$$PECQ = \frac{\sum \frac{C}{PEC}}{n}.$$

Классификация проводилась по следующим критериям: если среднее значение PECQ не превышало 0,1, осадки оценивались как незагрязненные, при  $0,1 < PECQ \leq 1,0$  осадки умеренно загрязненные, в случае  $PECQ > 1,0$  осадки сильно загрязненные [39].

### Результаты исследования

#### Химическая классификация сточных вод и осадков

По ОСТ 41-05-263-86 [40] сточные воды промканала изменяются от сильно солоноватых (Т2) до слабых рассолов (Т4). Воды левого притока (Т1) пресные, правого притока Т3 весьма слабосолоноватые. По жёсткости сточные воды изменяются: так, сточные воды в промканале (Т2 и Т4) очень жесткие; ливневые воды в притоках жесткие (Т3) и средней жёсткости (Т1) [41]. Интегрированная классификация сточных вод по сухому остатку и жёсткости представлена на рис. 3, а.

Сточные воды в промканале (Т2 и Т4) характеризуются сильной щелочной реакцией, высокой концентрацией хлоридов (31 г/л), натрия (11 г/л) и кальция (0,4 г/л), в отличие от поступающих в них ливневых вод, где концентрации ионов ниже в 94 раза (Т1 и Т3).

Сточные воды и водная вытяжка из ОСВ по анионному составу хлоридные, за исключением точки опробования Т1, где тип воды хлоридный, а в осадке – гидрокарбонатный. По катионному составу преимущественно воды натриевые. В целом сточные воды и осадки соответствуют следующей гидрохимической фации –  $Ca^{2+}-Mg^{2+}$  и  $Cl-SO_4^{2-}$ . Общий химический состав водной вытяжки осадков отражает специфику гидрохимических фаций сточных и ливневых вод, в которых он сформировался (рис. 3, б).

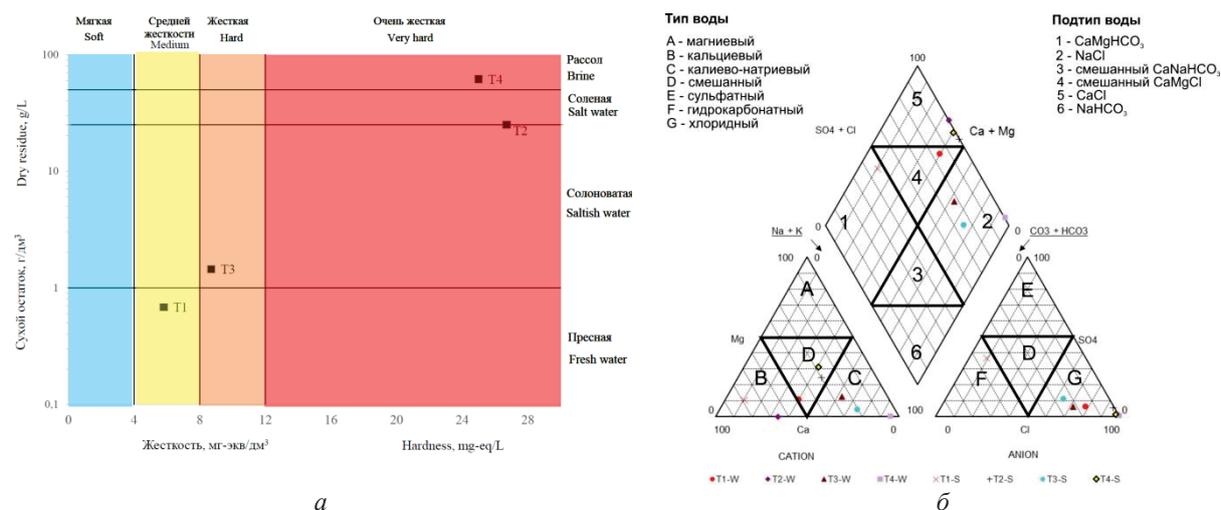


Рис. 3. Классификация химического состава сточных вод и осадков: а) классификация сточных вод по сухому остатку и жесткости; б) химический состав проб воды (W) и вытяжек из донного осадка (S) на диаграмме Пайпера

Fig. 3. Classification of chemical composition of wastewater and sewage sludge: a) wastewater classification by TDS and hardness; б) chemical composition of water samples (W) and bottom sludge extracts (S) on the Piper diagram

Содержание микроэлементов в осадках и оценка степени загрязнения ОСВ

Микроэлементный состав осадков сточных вод Березниковского промканала и его притоков, изученный в точках опробования Т1–Т4 в сравнении с данными исследований осадков на очистных сооружениях в Турции [42], Польше [43], Италии [44] и Китае [45], приводится в табл. 2. Следует отметить, что исследованиями охвачены, как правило, осадки сточных вод муниципальных очистных сооружений.

Согласно проведенным исследованиям (табл. 2), концентрации микроэлементов в ОСВ промканала

характеризуются значительными колебаниями. Наибольшее содержание микроэлементов отмечается в нижнем течении промканала (Т4).

Сопоставление полученных данных с результатами исследований осадков сточных вод в других странах свидетельствует о пониженном содержании Ni, Zn, Cu, Cd и Pb в изучаемых ОСВ промканала г. Березники. Вместе с этим содержание As, Cr, Se, Sr Ba в ОСВ промканала существенно выше концентраций этих элементов в осадке сточных вод, например, поступающих с муниципальной станции очистки сточных вод Померанского воеводства в Польше [43].

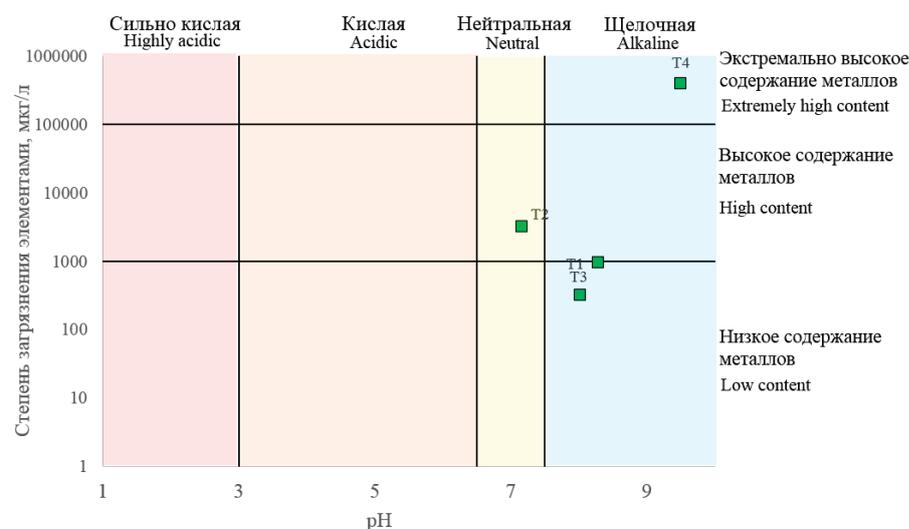
**Таблица 2.** Содержание микроэлементов в изученных пробах ОСВ промканала в сопоставлении с данными исследований в других странах, мг/кг

**Table 2.** Content of trace elements in sewage sludge in comparison with data from studies in other countries, mg/kg

Элемент Element	T1	T2	T3	T4	Турция Turkey [42]	Польша Poland [43]	Италия Italy [44]	Китай China [45]
Li	0,04	0,003	0,005	1,06	–	17,93	–	–
Cr	0,05	1,27	0,03	84,75	111,0	15,32	129,9	188,37
Co	0,007	0,007	0,002	31,52	–	–	–	–
Ni	0,02	0,05	0,008	34,21	75,0	53,85	71,4	56,22
Cu	0,05	0,30	0,012	32,99	–	113,28	335,2	259,0
Zn	0,05	0,31	0,01	55,53	1133,0	282,94	967,6	906,73
As	0,002	0,001	0,003	1,62	9,4	0,14	9,8	28,01
Se	0,0006	0,0009	0,0003	0,52	1,5	0,15	2,5	–
Sr	0,21	0,60	0,03	74,10	–	30,85	–	–
Mo	0,001	0,0006	0,0005	0,98	4,8	–	–	–
Cd	0,0002	0,0006	0,00001	0,07	1,7	1,16	1,0	10,78
Sn	0,002	0,0007	0,0006	0,11	–	–	–	–
Sb	0,0005	0,0004	0,0003	0,18	–	–	–	–
W	0,0005	0,0028	0,0004	0,37	–	–	–	–
Hg	0,0003	н/о	н/о	0,93	–	–	0,7	4,41
Ba	0,39	0,20	0,18	54,71	–	0,13	–	–
Pb	0,0193	0,0199	0,0033	18,13	–	23,92	54,9	81,74

Диаграмма Фиклика–Кабоя (рис. 4) была использована для классификации степени загрязнения ОСВ микроэлементами при сопоставлении их подвижности в различных кислотно-щелочных условиях [46]. Анализ данных диаграммы свидетельствует о пре-

имущественно щелочных условиях накопления осадков, и только в точке опробования Т2 среда нейтральная. Содержание микроэлементов в ОСВ значительно изменяется от низкого (Т3) до экстремально высокого содержания (Т4).



**Рис. 4.** Диаграмма Фиклика–Кабоя, иллюстрирующая степень загрязнения элементами по отношению к кислотно-щелочным условиям среды осадконакопления

**Fig. 4.** Ficklick–Caboy diagram illustrating the degree of elemental contamination in relation to the acid-alkaline conditions of the sedimentation environment

Оценка степени обогащения осадков относительно верхней части континентальной коры фиксирует значительное повышение концентрации относительно фона в нижнем течении промканала (рис. 5). При рассмотрении отдельных компонентов наибольшая степень обогащения в пробе Т4 фиксируется по содержанию ртути, общий ранжированный ряд по обогащению относительно верхней части континентальной коры:

Hg>Se>Co>Cr>Cu>Ni>Zn>Pb>As>Mo>Cd>Sb>W>Ba>Li>Sn.

Нормализованные значения в верхней части промканала (Т2) коррелируют со значениями осадков ливневых вод старого русла р. Толыч (Т3), что в целом соответствуют среднему обогащению. На нормированном графике хорошо заметно обогащение осадков в Т2 и Т3 по Cr, Cu и Se. Наименьшая степень обогащения отмечается в осадках ливневых вод с промзоны (Т1).

По результатам расчета индекса геоаккумуляции  $I_{geo}$  (рис. 6) чрезмерное загрязнение ( $I_{geo}>5$ ) зарегистрировано в нижнем течении промканала (Т4) по всем исследуемым элементам, а также в среднем течении (Т2) по содержанию Cr, Cu, Se, Zn и Cd. Наиболее высокие значения  $I_{geo}$  в точке опробования Т1 были зарегистрированы по Se ( $I_{geo}>5$ ) и Hg ( $4<I_{geo}<5$ ), что соответствует классу загрязнения от сильно до чрезмерно загрязненных осадков. Наименьшие значения  $I_{geo}$  зафиксированы в точке опробования Т3 и колебались между 3,7(Se) и 0,17(Co), что соответствует уровню загрязнения от сильно загрязненных до незагрязненных осадков.

Анализируя значения  $I_{geo}$  в ОСВ промканала, можно сделать вывод, что уровень риска загрязнения окружающей среды микроэлементами является экстремально высоким в Т4 с максимальной аккумуляцией Hg в осадках на этом участке промканала.

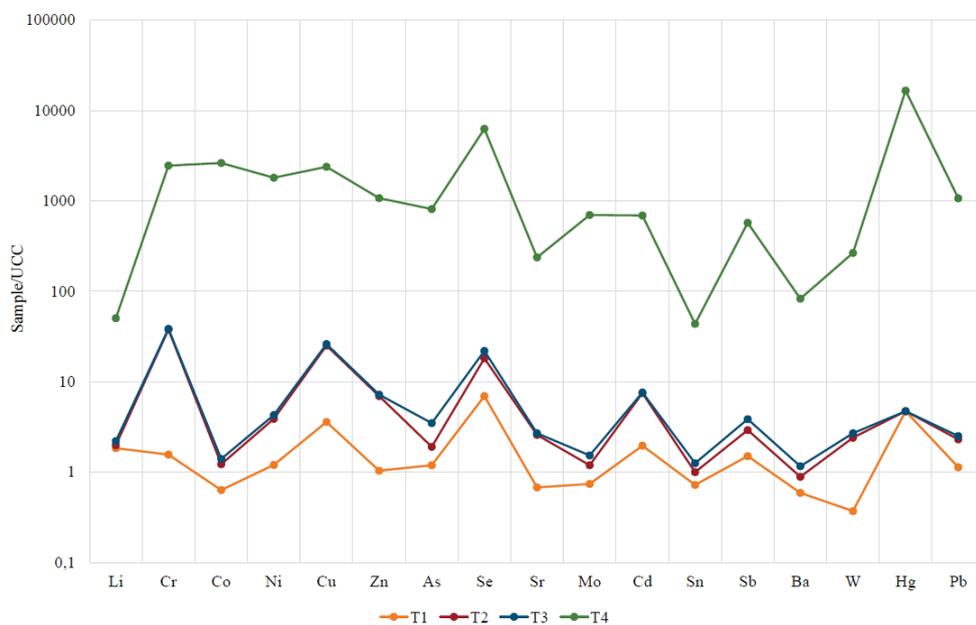


Рис. 5. Степень обогащения осадков промканала относительно верхней континентальной коры [35]

Fig. 5. Degree of enrichment of sewage sludge of the industrial channel relative to the upper continental crust [35]

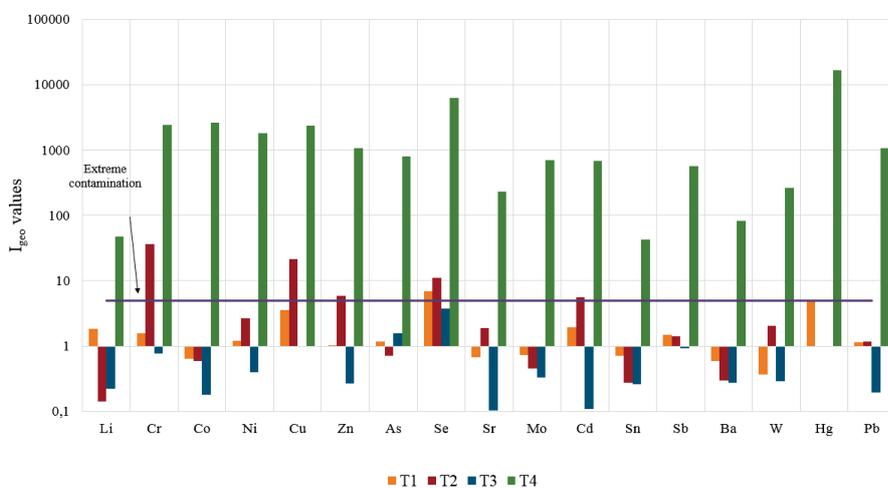


Рис. 6. Распределение значений индекса геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ) в осадках промканала

Fig. 6. Distribution of values of the geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ) in sewage sludge of industrial channel

Значения индекса потенциального экологического риска (RI) для микроэлементов в осадках представлены на рис. 7. Согласно расчету, значения RI варьировали от 0,06 до 173,04 (от низкого до умеренного экологического риска). Более опасная категория (умеренный экологический риск) фиксируется только в точке опробования Т4. Самые низкие средние значения RI установлены для точки опробования Т3 (ливневые сточные воды с площади водосбора старого русла р. Толыч). Коэффициент экологической опасности элементов ( $E_r^i$ ) в точке опробования Т4 снижался в следующем порядке:

$Hg > Ni > Cd > Cu > Co > As > Cr > Pb > Mo > Sb > Zn > W > Sn > Sr > Ba$ .

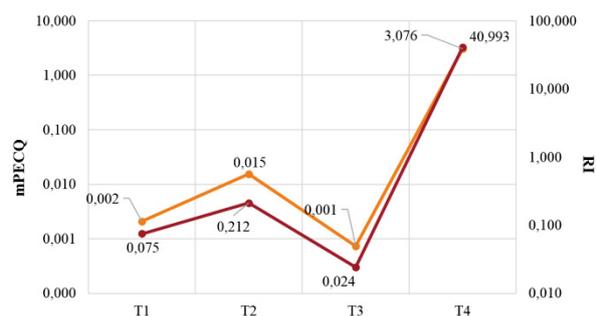


Рис. 7. Среднее значение PECQ и индекс потенциального экологического риска (RI) в осадках промканала

Fig. 7. Average PECQ value and potential ecological risk index (RI) in sewage sludge of industrial channel

Среднее значение PECQ микроэлементов варьировалось от 0,001 до 3,08 (рис. 7). Самые высокие и низкие средние значения PECQ коррелируют со значениями RI и наблюдаются, соответственно, в точках наблюдения Т4 и Т3. Наибольшее среднее значение PECQ в точке опробования Т4 характеризует осадки

как сильно загрязненные, ОСВ на других участках обследования соответствуют категории незагрязненных.

Оценка степени загрязнения осадка согласно природоохранным нормативам

Оценка химического загрязнения осадка произведена в соответствии с российскими природоохранными нормативами по содержанию микроэлементов в почвенном покрове (СанПиН 1.2.3685-21).

Соответствие концентраций в осадке указанному документу позволяет внесение осадка в грунт и почву при технических и мелиоративных мероприятиях. В результате сопоставления выявлено, что концентрации большинства нормируемых веществ соответствуют нормативным требованиям, исключение из этого ряда составляет содержание цинка и никеля (рис. 8). При этом достижение содержания, эквивалентного 1,0 и 1,7 ПДК, соответственно, наблюдается при оценке относительно почв супесчаного и песчаного механического состава. Предельные концентрации Zn и Ni для суглинистых и глинистых почв в исследуемом осадке не обнаружены.

Оценка санитарного состояния ОСВ промканала по дополнительным показателям

В пробе из нижнего течения промканала (Т4), характеризующейся наибольшей степенью загрязнения, проведены дополнительные исследования по перечню показателей, соответствующему российским природоохранным нормативам. В частности, проведено изучение активности естественных радионуклидов ( $^{40}K$ ,  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$ ), содержания органических веществ (нефтепродуктов, бенз(а)пирена, фенолов). Кроме того, определен индекс БГКП (бактерий группы кишечной палочки), зольность осадка и индекс токсичности с применением биотестирования.

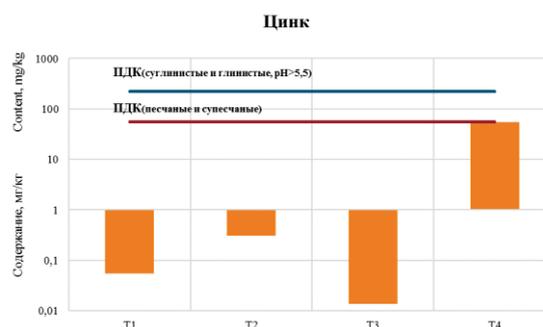


Рис. 8. Сравнение концентраций Zn и Ni в осадке с ПДК для почв по СанПиН 1.2.3685-21

Fig. 8. Comparison of Zn and Ni concentrations in sewage sludge with the maximum permissible concentrations for soils in Russia

Удельная активность природных радионуклидов в пробе ОСВ составляет:  $^{40}K$  – 244,4 Бк/кг,  $^{226}Ra$  – 7,5 Бк/кг,  $^{232}Th$  – 11,0 Бк/кг, что незначительно превышает значения в почве и донных отложениях в пределах территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей [47]. При этом в сравнении со средними мировыми значениями [48] содержание природных радионуклидов в ОСВ из промканала ниже: в 4,3 раза по  $^{226}Ra$ , в 4,1 раза по  $^{232}Th$  и в 1,7 раза по  $^{40}K$ .

Суммарное содержание нефтепродуктов в пробе Т4 составило 4600 мг/кг, что в 4,6 раз превосходит допустимый уровень в соответствии с российским природоохранным законодательством. При этом содержание бенз(а)пирена и фенолов в пробе осадков не превысило предела чувствительности аналитических методов (<0,005 и <0,001 мг/кг, соответственно). Бактериологическая оценка на основании показателя индекса БГКП=1,0 кл/г свидетельствует об эпидемиологической безопасности ОСВ.

Испытание водных вытяжек ОСВ выполнено на основании методики измерений индекса токсичности почв, почвогрунтов, вод и отходов по изменению подвижности половых клеток млекопитающих *in vitro*. Биотест показал безопасность водных вытяжек ОСВ для клеток теплокровных животных, поскольку индекс токсичности составил 83,1 %, что соответствует установленной методикой диапазону оптимальной подвижности сперматозоидов ( $80 \% < Ir < 120 \%$ ). Таким образом, по результатам биотестирования на сперме быка ОСВ относится к V классу опасности (нетоксичные) согласно Постановлению № 536 Минприроды или к IV классу опасности (малоопасные) согласно СП 2.1.7.1386-03.

В соответствии с ГОСТ Р 59748-2021, основным требованием получения продукта из ОСВ является показатель зольности не менее 65 %. Высокое значение зольности свидетельствует, что ОСВ – это смесь органических и минеральных веществ [49]. В результате выполненных исследований установлено, что осадок из нижнего течения промканала соответствует требованиям для получения материала рекультивантов, поскольку показатель зольности в пробе Т4 составил 92 %.

### Обсуждение результатов

Мировой опыт использования осадков сточных вод

По данным Росводоканала, в России ежегодно образуется 7–8 млн т ОСВ. Образованные осадки направляются на утилизацию. Так, осадки сточных

вод в Санкт-Петербурге уплотняются, механически обезвоживаются, собираются в накопителях и утилизируются путем сжигания [50, 51].

Степень диверсификации в обращении с осадками сточных вод во многих странах существенно выше. Так, в 2021 г. в США было произведено 4,5 млн т сухого ОСВ, из которых: 1,15 млн т внесено на сельскохозяйственные угодья, 35 тыс. т внесено на рекультивационные площадки, 796 тыс. т нашли другое применение при землеустройстве (ландшафтный дизайн, поля для гольфа и т. д.); 633 тыс. т подвергли сжиганию, 1,8 млн т – захоронению на полигоне ТКО, 95 тыс. т – захоронению на монополигоне; другие методы утилизации применили в отношении 57 тыс. т (закачка в глубокое скважины и др.) [52]. В то же время в Канаде ежегодно производят 660 тыс. т сухих ОСВ, доступных для использования в сельском хозяйстве [53].

В Европе основными производителями ОСВ являются Германия, Испания и Франция, где ежегодно образуется 1,74; 1,19 и 1,17 млн т, соответственно [54]. В настоящее время в Европе основными способами утилизации ОСВ являются: использование в сельском хозяйстве (Ирландия и Норвегия), сжигание (Нидерланды, Бельгия и Австрия) и размещение на свалках (Турция и Румыния) (рис. 9). Вместе с этим ОСВ находят применение в зеленых зонах и лесном хозяйстве (Ирландия, Латвия и Словакия) [55], в производстве строительных материалов для дорожного строительства (Польша) [56].

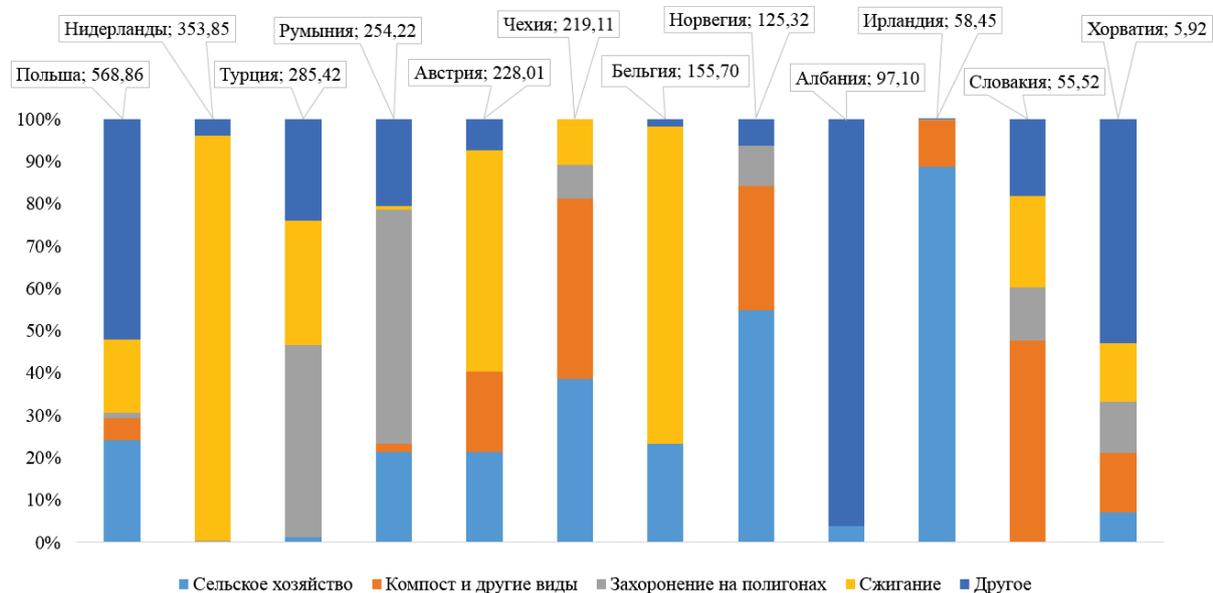


Рис. 9. Применение и утилизация ОСВ в странах ЕС в 2020 г. (страна, тыс. т)

Fig. 9. Use and disposal of sewage sludge in the EU in 2020 (country, thousand tons)

В одной из крупнейших в мире стран – Китае – к 2019 г. объемы образования осадков достигли 39,04 млн т в год. Основные направления утилизации осадков, применяемые в Китае: сжигание (45,11 %) > утилизация на свалках (23,04 %) > внесение в землю (17,64 %) > производство строительных материалов (14,21 %) [57]. В производстве строительных материалов ОСВ в Китае

используются как основа для изготовления кирпича, керамзита и бетона [58]. Кроме очевидной пользы, связанной с замещением природных строительных материалов, наблюдается побочный экологический эффект. Так, тяжелые металлы, содержащиеся в канализационных отложениях или осадках сточных вод, могут быть эффективно иммобилизованы в керамзите [59].

Возможные ограничения при использовании ОСВ

Одним из ведущих требований к ОСВ в рамках концепции циркулярной экономики является соответствие осадков требованиям к уровню микроэлементов при рассмотрении их использования в сельском хо-

зяйстве, зеленых зонах или лесном хозяйстве [60]. При этом нормативные значения в отношении управления ОСВ во всем мире зависят от нормативных актов каждой страны и региона (табл. 3).

**Таблица 3.** Нормативные значения содержания микроэлементов в осадке сточных вод, предназначенном для внесения в природную среду, мг/кг [34, 61]

**Table 3.** Limit values of the trace elements in the sewage sludge for agricultural use and their mean contents in other countries, mg/kg [34, 61]

Элементы Elements	Польша Poland	ЕС EU	Китай/China		США USA	Канада Canada	ЮАР South Africa
			pH<6,5	pH>6,5			
Cd	20	20–40	5	20	39	1,25	40
Ni	300	300–400	100	200	420	–	420
Zn	2500	2500–4000	500	1000	2800	2000	2800
Cu	1000	1000–1750	250	500	1500	500	1500
Cr	500	–	600	1000	–	1000	1200
Pb	750	750–1200	300	1000	300	200	300

Ограничения при обращении с ОСВ в России определяются нормативными документами: ГОСТ Р 54534-2011 при использовании в качестве рекультиванта и ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 при внесении в качестве удобрений. Следует отметить, что настоящие стандарты предназначены исключительно для осадков, образующихся в процессе очистки хозяйственно-бытовых и городских стоков, а также близких к ним по составу производственных сточных вод.

Концентрация микроэлементов является ограничивающим фактором не только при внесении в компоненты окружающей среды, но также и при термической обработке ОСВ. Ранее проведенные исследования свидетельствуют о необходимости комплексного контроля выбросов тяжелых металлов при сжигании и прокаливании ОСВ [62].

Наряду с содержанием микроэлементов, использование осадка в сельском хозяйстве может быть существенно ограничено высоким содержанием водорастворимых солей. Так, использование в сельском хозяйстве ОСВ с экстремальным содержанием хлоридов (12–19 г/кг), является невозможным, поскольку избыток Cl<sup>-</sup> может вызывать нарушения в ионной системе растения, вызванные ограниченным поглощением K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Вместе с этим осаждение сильно засоленных взвесей в прудах-отстойниках или каналах, расположенных непосредственно на проницаемых грунтах, способствует засолению грунтовых вод и почв, что показано при исследованиях в Польше [4].

Пути обращения с осадками сточных вод  
 Березниковского промканала

Преимущественное присутствие сточных вод с высоким содержанием Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup> в промканале г. Березники связано с технологией производства прилегающих предприятий, где исходным сырьем являются рассолы или калийная руда Верхнекамского месторождения, известняки с ближайших месторождений [63, 64].

Результаты расчетов эколого-геохимических показателей выявили различную степень загрязнения микроэлементами в осадках. В нижнем течении

промканала (Т4) на основании высоких концентраций микроэлементов в осадках зафиксирован наибольший уровень загрязнения относительно других точек опробования. Помимо высокого уровня загрязнения микроэлементами в Т4, в этой точке отмечается экстремальное содержание хлоридов в ОСВ, которое наблюдается и в среднем течении промканала (Т2).

Вместе с этим содержание токсичных микроэлементов в составе осадка даже в точке Т4 существенно ниже, чем в аналогичных объектах Турции, Польши, Италии и Китая. Также исследованиями показана радиологическая безопасность осадка, отсутствие острой токсичности и бактериологического загрязнения, умеренное содержание нефтепродуктов.

Длительное использование промканала привело к образованию значительной мощности осадков, которые могут повлиять на снижение скорости потока и пропускной способности канала. Учитывая открытый тип исполнения канала, поступление большого количества осадков либо аварийные сбросы потенциально могут привести к переполнению канала и разливу сточных вод на прилегающую территорию.

Указанные факты говорят о необходимости поиска экологически безопасных способов применения и утилизации накопленного осадка. Выемка и захоронение осадка на специализированных полигонах является крайне затратным мероприятием. Высокое содержание хлоридов исключает применение его в сельскохозяйственной сфере. Учитывая мировой опыт обращения с ОСВ, а также невысокое содержание в осадке токсичных микроэлементов, перспективным направлением может являться разработка технологий переработки осадка из промканала города Березники в строительные материалы.

### Заключение

Промышленный канал города Березники является техногенным объектом с большой историей. С 1950-х гг. он принимает в себя стоки нескольких крупных промышленных предприятий. Использование канала предусматривает механическую очистку сточных вод и перекачку их в Камское водохранилище в относительно очищенном виде. Вместе с этим при отстаива-

нии и очистке сточных вод образуется большой объем осадков сточных вод. Эти осадки заполняют ложе канала и занимают значительный объем. При отсутствии специальных мероприятий по выемке и использованию или захоронению осадков неизбежна ситуация, когда количество накопленных осадков создаст угрозу функционированию этого объекта.

Изучение состава осадков свидетельствует о преимущественной роли хлоридов кальция, натрия и калия в составе накопленных отложений. Геохимическая специфика осадков соответствует составу сточных вод с предприятий, которые перерабатывают запасы Верхнекамского месторождения солей. Сточные воды преимущественно щелочные, жесткие, в их составе доминируют хлорид-ионы, а также натрий и кальций. Формирующийся осадок сточных вод закономерно характеризуется преобладанием хлоридов кальция, натрия и калия в составе накопленных отложений. В микроэлементном составе относительно кларка верхней части континентальной коры осадки обогащены ртутью, селеном, кобальтом, хромом, никелем, медью и рядом других веществ, причем осадки из нижнего течения канала характеризуются более высокими концентрациями токсичных элементов. Так, согласно расчету индекса геоаккумуляции  $I_{geo}$ , проба ОСВ из нижнего течения канала характеризуется категорией «чрезмерное загрязнение» по содержанию всех 17 исследованных веществ. В среднем течении канала сопоставимый уровень загрязнения определен по содержанию Cr, Cu, Se, Zn и Cd. Необходимо отметить, что привнос тяжелых металлов происходит и с ливневыми водами. Так, степень обогащения донных осадков из сборников ливневых вод, опробованных в точках Т1 и Т3, селеном и ртутью соответствует классу загрязнения от сильно до чрезмерно загрязненных осадков.

В то же время рассчитанный с применением местного фона потенциальный экологический риск (RI)

микроэлементов в осадках характеризуется как низкий в средней части канала и умеренный в нижнем течении. Согласно расчету качества осадка РЕСQ, наблюдается сильное загрязнение осадка в нижнем течении, при этом в среднем течении ОСВ относится к категории незагрязненных.

В целом применение расчетных индексов показывает значительную степень обогащения осадков микроэлементами относительно природных объектов, однако относительно невысокую в сравнении со схожими образованиями и местным фоном. Так, в сопоставлении с данными изучения ОСВ на станциях очистки муниципальных стоков в различных странах изученные образцы осадка характеризуются умеренным содержанием токсичных элементов (которое, однако, повышается в нижнем течении канала). Также настоящими исследованиями показано, что ОСВ безопасны в радиационном отношении и не проявляют признаков бактериального загрязнения.

Результаты исследований позволяют определить разработку технологий производства строительных материалов как наиболее перспективное направление возможного использования накопленного осадка из промканала города Березники. Перспективы продолжения исследований осадка промышленного канала связаны с количественным расчетом мощности накопленных отложений, определении оставшейся ёмкости промышленного канала и разработкой технологий переработки осадка.

*Исследования проведены при поддержке гранта Президента РФ № МК-4377.2022.1.5.*

*Авторы выражают благодарность Сектору наноминералогии Центра коллективного пользования Пермского государственного национального исследовательского университета за проведение лабораторных аналитических исследований.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biotreatment of high-salinity wastewater: current methods and future directions / Y. Zhao, X. Zhuang, S. Ahmad, S. Sung, S.-Q. Ni // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2020. – V. 36. – Article number 37. URL: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02815-4> (дата обращения 15.12.2022).
2. AlJaber F. Y., Ahmed S. A., Makki H. F. Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization // *Heliyon*. – 2020. – V. 6. – Iss. 6. – Article number e03988. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03988> (дата обращения 15.12.2022).
3. Ching Y. C., Redzwan G. Biological treatment of fish processing saline wastewater for reuse as liquid fertilizer // *Sustainability*. – 2017. – V. 9 (7). – Article number 1062. URL: <https://doi.org/10.3390/su9071062> (дата обращения 15.12.2022).
4. Golub A., Piekutin J. Pollution of sedimentary ponds at an industrial plant in Janikowo (Poland) // *Water*. – 2020. – V. 12 (2). – Article number 536. URL: <https://doi.org/10.3390/w12020536> (дата обращения 15.12.2022).
5. Review of chloride ion detection technology in water / D. Wu, Y. Hu, Y. Liu, R. Zhang // *Applied Sciences*. – 2021. – V. 11 (23). – Article number 11137. URL: <https://doi.org/10.3390/app112311137> (дата обращения 15.12.2022).
6. Экологическая безопасность освоения месторождений полезных ископаемых: монография / под общ. ред. Е.А. Хайрулиной. – Пермь: ПГИУ, 2022. – 175 с.
7. Bätke J., Coring E. Biological effects of anthropogenic salt-load on the aquatic fauna: a synthesis of 17 years of biological survey on the rivers Werra and Weser // *Limnologica*. – 2011. – V. 41 (2). – P. 125–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.limnol.2010.07.005> (дата обращения 15.12.2022).
8. Salinisation of rivers: an urgent ecological issue / M. Cañedo-Argüelles, B.J. Kefford, C. Piscart, N. Prat, R.B. Schäfer, C.J. Schulz // *Environmental Pollution*. – 2013. – V. 173. – P. 157–167. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.011> (дата обращения 15.12.2022).
9. Braukmann U., Böhme D. Salt pollution of the middle and lower sections of the river Werra (Germany) and its impact on benthic macroinvertebrates // *Limnologica*. – 2011. – V. 41. – P. 113–124. URL: <https://doi.org/10.1016/j.limnol.2010.09.003> (дата обращения 15.12.2022).
10. Schulz C.-J., Cañedo-Argüelles M. Lost in translation: the German literature on freshwater salinization // *Philosophical Transactions the Royal Society B*. – 2019. – V. 374. – Article number 20180007. URL: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0007> (дата обращения 15.12.2022).
11. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – М.: Эpsilon Плюс, 2013. – 368 с.
12. Мировой опыт использования отходов производства соды / С.А. Красильникова, С.М. Блинов, П.А. Красильников, П.А. Белкин // *Экология и промышленность России*. – 2021. – Т. 25. – № 12. – С. 48–53. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-48-53> (дата обращения 15.12.2022).
13. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А. Техногенное воздействие Соликамско-Березниковского промузла на поверхностные водные объекты // *Горный журнал*. – 2008. – № 10. – С. 92–96.

14. Экогеохимическая и биондикационная оценка загрязнения малых рек города Березники / Е.С. Ушакова, П.А. Белкин, М.А. Бакланов, Е.В. Дробинина, А.Ю. Пузик // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21. – № 4. – С. 384–393. URL: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.4.375> (дата обращения 15.12.2022).
15. Wastewater discharge standards in the evolving context of urban sustainability – the case of India / T. Schellenberg, V. Subramanian, G. Ganeshan, D. Tompkins, R. Pradeep // *Frontiers in Environmental Science*. – 2020. – V. 8. – Article number 30. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00030> (дата обращения 15.12.2022).
16. Жданов А.Ф. Березники – город уральских химиков. – Молотов: Молотовское книжное издательство, 1956. URL: <https://libking.ru/books/sci-/sci-history/1146465-aleksandr-zhdanov-berezniki-gorod-u-ralskih-himikov.html> (дата обращения 15.11.2022).
17. Правила использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Каме. Утв. приказом Федерального агентства водных ресурсов от 07.11.2016 № 255.
18. Способ очистки сточных вод титано-магниевого производства: пат. Рос. Федерация, № 2141456, заявл. 06.11.1998; опубл. 20.11.1999. – 5 с.
19. Крепышева И.В., Рудакова Л.В., Козлов С.Г. Физико-химические и токсикологические свойства шлама содового производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 1. – С. 335–342.
20. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 8-2015. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – М.: Бюро НДТ, 2015. – 129 с.
21. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 2-2019. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. – М.: Бюро НДТ, 2015. – 836 с.
22. Утилизация промышленных стоков титаномагниевого производства / Н.А. Куленова, З.М. Ахметвалиева, С.В. Мамячев, О.С. Анисимова // *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. – 2019. – Т. 1. – С. 25–33. URL: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-25-33> (дата обращения 15.12.2022).
23. Физико-химические основы комбинированной энергоресурсоэффективной технологии переработки стоков производства кальцинированной соды / В.П. Мешалкин, Н.С. Шулаев, Н.А. Быковский, В.М. Аристов // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. – 2020. – Т. 494. – № 1. – С. 45–49. URL: <https://doi.org/10.31857/S268695352005009X> (дата обращения 15.12.2022).
24. Экогеохимическая оценка рек Ярлы-Амры и Чибитка, расположенных в ороле действия Акташского ртутного месторождения и его отвалов (Горный Алтай) / И.Н. Мягкая, Б.Ю. Сарыг-оол, И.С. Кириченко, М.А. Густайтис, Е.В. Лазарева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 7–26. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3273> (дата обращения 15.12.2022).
25. Nakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // *Water Research*. – 1980. – V. 14. – Iss. 8. – P. 975–1001. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8) (дата обращения 15.12.2022).
26. Ушакова Е.С., Караваяева Т.И., Белкин П.А. Экологическое состояние почв промышленных территорий (на примере г. Березники, Пермский край): сравнение отечественных и зарубежных методов оценки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 58–70. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2850> (дата обращения 15.12.2022).
27. Calculation and application of Sb toxicity coefficient for potential ecological risk assessment / N. Wang, A. Wang, L. Kong, M. He // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 610–611. – P. 167–174. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.268> (дата обращения 15.12.2022).
28. Jeong H., Ra K. Investigations of metal pollution in road dust of steel industrial area and application of magnetic separation // *Sustainability*. – 2022. – V. 14. – Article number 919. URL: <https://doi.org/10.3390/su14020919> (дата обращения 15.12.2022).
29. Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva Bay, Perm Region (Russia) / E. Ushakova, E. Menshikova, S. Blinov, S. Vaganov, R. Perevoshchikov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2022. – V. 23. – № 4. – P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/146269> (дата обращения 15.12.2022).
30. The content and sources of potentially toxic elements in the road dust of Surgut (Russia) / D. Moskovchenko, R. Pozhitkov, A. Soromotin, V. Tyurin // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13 (1). – Article number 30. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13010030> (дата обращения 15.12.2022).
31. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river // *GeoJournal*. – 1969. – V. 2. – P. 108–118.
32. Донные отложения рек техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: сравнительная оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами по отечественным и зарубежным критериям / В.Е. Закруткин, В.Н. Решетняк, О.С. Решетняк, Е.В. Гибков // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2021. – Т. 85. – № 4. – С. 554–564. URL: <https://doi.org/10.31857/S2587556621040130> (дата обращения 15.12.2022).
33. Risk analysis of heavy metals migration from sewage sludge of wastewater treatment / R. Kowalik, J. Gawdzik, P. Bak-Patyna, P. Ramiaczek, N. Jurišević // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – V. 19 (18). – Article number 11829. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph191811829> (дата обращения 15.12.2022).
34. Tytla M., Widziewicz-Rzońca K. Heavy metals in municipal sewage sludge – a brief characteristic of potential threats and methods used to assess the ecological risk // *Environment, Earth and Ecology*. – 2021. – V. 5 (1). – P. 18–25. URL: <https://doi.org/10.24051/eee/134276> (дата обращения 15.12.2022).
35. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – V. 59. – P. 1217–1232. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2) (дата обращения 15.12.2022).
36. Шабанов М.В., Стрекулев Г.Б. Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах Южного Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 184–192. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3011> (дата обращения 15.12.2022).
37. Predictions of sediment toxicity using consensus-based freshwater sediment quality guidelines / C.G. Ingersoll, D.D. MacDonald, N. Wang, J.L. Crane, L.J. Field, P.S. Haverland, N.E. Kemple, R.A. Lindskoog, C. Severn, D.E. Smorong // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2001. – V. 41. – P. 8–21. URL: <https://doi.org/10.1007/s002440010216> (дата обращения 15.12.2022).
38. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems / D.D. MacDonald, C.G. Ingersoll, T.A. Berger // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2000. – V. 39. – P. 20–31. URL: <https://doi.org/10.1007/s002440010075> (дата обращения 15.12.2022).
39. Long E.R. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review // *Environmental Science & Technology*. – 2006. – V. 40. – № 6. – P. 1726–1736. URL: <https://doi.org/10.1021/es058012d> (дата обращения 15.12.2022).
40. ОСТ 41-05-263-86. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. – 9 с.
41. Гусева Т.В. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справоч. материалы. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. – 192 с.
42. Yakameran E., Ari A., Aygün A. Land application of municipal sewage sludge: human health risk assessment of heavy metals // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 319. – Article number 128568. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128568> (дата обращения 15.12.2022).
43. The concentration of trace elements in sewage sludge from wastewater treatment plant in Gniewino / J. Milik, R. Pasela, M. Lachowicz, M. Chalamoński // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – V. 18. – Is.5. – P. 118–124. URL:

- <https://doi.org/10.12911/22998993/74628> (дата обращения 15.12.2022).
44. Sewage sludge quality and management for circular economy opportunities in Lombardy / M. Domini, G. Bertanza, R. Vahidzadeh, R. Pedrazzani // *Applied Sciences*. – 2022. – V. 12 (20). – Article number 10391. URL: <https://doi.org/10.3390/app122010391> (дата обращения 15.12.2022).
  45. Nationwide review of heavy metals in municipal sludge wastewater treatment plants in China: Sources, composition, accumulation and risk assessment / X. Cheng, C. Wei, X. Ke, J. Pan, G. Wei, Y. Chen, C. Wei, F. Li, S. Preis // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – V. 437. – Article number 129267. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129267> (дата обращения 15.12.2022).
  46. Hydrogeochemistry and heavy metal contamination in groundwaters of Dhaka metropolitan city, Bangladesh: assessment of human health impact / S. Sharmin, J. Mia, M.S. Miah, H.M. Zakir // *Hydro Research*. – 2020. – V. 3. – P. 106–107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.10.003> (дата обращения 15.12.2022).
  47. Перевошиков Р.Д. Естественные радионуклиды (<sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th) в депонирующих средах (территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 29–38. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/3/3599> (дата обращения 15.12.2022).
  48. UNSCEAR. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes. – New York, United Nations Publ., 2000. – 659 p.
  49. Обработка осадков городских сточных вод / Л.П. Хисамеева, А.С. Селюгин, Р.Н. Абитов, А.В. Бусарев, Н.С. Урмитова. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 105 с. URL: <https://www.kgasu.ru/upload/iblock/efc/obrabotka-osadkov-gorodskikh-stochnykh-vod.pdf> (дата обращения 10.11.2022).
  50. В Санкт-Петербурге для утилизации осадка сточных вод применяются инновационные технологии. Сайт Администрации Санкт-Петербурга. – 2016. URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otas/ingen/news/92909/> (дата обращения 11.11.2022).
  51. Представители Водоканала обсудили стандарты обработки и утилизации осадка сточных вод со специалистами из Германии. Сайт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». – 2021. URL: [http://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/predstaviteli\\_vodokanala\\_obsudili\\_standarty\\_obrabotki\\_i\\_utilizacii\\_osadka\\_stochnykh\\_vod\\_so\\_specialistami\\_iz\\_germanii/](http://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/predstaviteli_vodokanala_obsudili_standarty_obrabotki_i_utilizacii_osadka_stochnykh_vod_so_specialistami_iz_germanii/) (дата обращения 11.11.2022).
  52. EPA Basic Information about Biosolids. URL: <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-biosolids> (дата обращения 12.07.2022).
  53. Vaithyanathan V.K., Cabana H. Integrated biotechnology management of biosolids: sustainable ways to produce value-added products // *Frontiers in Water*. – 2021. – V. 3. – Article number 729679. URL: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.729679> (дата обращения 15.12.2022).
  54. Eurostat. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/water> (дата обращения 06.09.2022).
  55. Legislation for the reuse of biosolids on agricultural land in Europe: overview / M.C. Collivignarelli, A. Abbà, A. Frattarola, M. Carnevale Miino, S. Padovani, I. Katsoyannis, V. Torretta // *Sustainability*. – 2019. – V. 11 (21). – Article number 6015. URL: <https://doi.org/10.3390/su11216015> (дата обращения 15.12.2022).
  56. Zabielska-Adamska K. Bottom ash characteristics and potential application in road embankment // *Sustainability*. – 2020. – V. 12 (1). – Article number 39. URL: <https://doi.org/10.3390/su12010039> (дата обращения 15.12.2022).
  57. Development, current state and future trends of sludge management in China: based on exploratory data and CO<sub>2</sub>-equivalent emissions analysis / L. Wei, F. Zhu, Q. Li, C. Xue, X. Xia, H. Yu, Q. Zhao, J. Jiang, S. Bai // *Environment International*. – 2020. – V. 144. – Article number 106093. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106093> (дата обращения 15.12.2022).
  58. Tang C.-W., Cheng C.-K. Sustainable use of sludge from industrial park wastewater treatment plants in manufacturing lightweight aggregates // *Materials*. – 2022. – V. 15 (5). – Article number 1785. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15051785> (дата обращения 15.12.2022).
  59. Characterization, spatial variation and management strategy of sewer sediments collected from combined sewer system: a case study in Longgang District, Shenzhen / Y. Luo, S. Bao, S. Yang, Y. Zhang, Y. Ping, C. Lin, P. Yang // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2021. – V. 18 (14). – Article number 7687. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph18147687> (дата обращения 15.12.2022).
  60. Rosiek K. Directions and challenges in the management of municipal sewage sludge in Poland in the context of the circular economy // *Sustainability*. – 2020. – V. 12 (9). – Article number 3686. URL: <https://doi.org/10.3390/su12093686> (дата обращения 15.12.2022).
  61. Duan B., Feng Q. Risk assessment and potential analysis of the agricultural use of sewage sludge in Central Shanxi Province // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – V. 19 (7). – Article number 4236. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph19074236> (дата обращения 15.12.2022).
  62. Comprehensive evaluation of the control efficiency of heavy-metal emissions during two-step thermal treatment of sewage sludge / Y. Li, Z. Fang, W. Teng, S. Shen, R. Li // *ACS Omega*. – 2020. – V. 38 (5). – P. 24467–24476. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02939> (дата обращения 15.12.2022).
  63. Сидорова И.Т. Становление химической промышленности в Верхнекамье на примере Березниковского химического комбината // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: История и политические науки*. – 2010. – Т. 2. – С. 80–83. URL: <https://www.istpolitmgou.ru/journal/view/1165> (дата обращения 15.11.2022).
  64. Блинов С.М., Меньшикова Е.А. Использование отходов предприятий Пермского края // *Вестник Пермского университета. Геология*. – 2019. – Т. 18 – № 2. – С. 179–181. URL: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.2.179> (дата обращения 15.12.2022).

Поступила: 23.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 03.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Ушакова Е.С.**, младший научный сотрудник Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Белкин П.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Дробинина Е.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры динамической геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета.

UDC 504.064

## SEWAGE SLUDGE FORMATION CHARACTERISTICS AND ENVIRONMENTAL STATUS OF THE INDUSTRIAL WASTEWATER CHANNEL

Evgeniya S. Ushakova<sup>1</sup>,  
ushakova.evgeniya@gmail.com

Pavel A. Belkin<sup>1</sup>,  
pashabelkin@mail.ru

Elena V. Drobinina<sup>1</sup>,  
alenadrobinina@yandex.ru

<sup>1</sup> Perm State University,  
15, Bukirev street, Perm, 614068, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the need to obtain baseline data for the safe handling of sewage sludge produced resulting the sedimentation of the suspended solids from wastewater of industrial channel.

**The main aim** of the research is to characterize the chemistry of wastewater and sewage sludge in an industrial channel, and to determine the environmental status and possible options for handling sewage sludge.

**The object** of the study is the industrial channel or sewage transport channel of the city Berezniki (Perm Krai, Russia). This channel is an artificial waterway with a total length of 8,9 km. It was formed in the middle of the last century with the aim of protecting the industrial area of the city Berezniki from waterlogging and the organization of unified urban industrial canalization. At present, the channel accepts industrial wastewater from a number of plants, as well as wastewater from the city treatment facilities and storm water runoff. A treatment plant operates at the mouth of the channel, after which the treated water enters the Kama reservoir.

**The research methods** included determination of major ions and trace element of wastewater and sewage sludge of industrial channel using capillary electrophoresis together with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Additionally, microbiological and radiological parameters of the sewage sludge were determined using the methods established by the environmental legislation of the Russian Federation. In this study the contamination degree of wastewater and sewage sludge was assessed using quality guidelines, geochemical and environmental indices. To understand environmental status and geochemical assessment of sewage sludge of the industrial channel the major ions and trace element contamination of the samples were assessed based on potential ecological risk index, geoaccumulation index, sediment quality coefficient.

**Results.** The sewage sludge samples are characterized by a moderate content of toxic elements, are safe in terms of radiation and show no signs of bacterial contamination. However, the contamination degree of sewage sludge increases significantly to the lower part of the industrial channel. Sewage sludge in the lower part of the industrial channel (in before treatment plant) is significantly enriched in all studied trace elements in comparison with the upper continental crust. It was found that the degree of contamination by  $I_{geo}$  in the industrial channel ranged from heavily contaminated to extremely contaminated. The highest values of the index of geoaccumulation ( $I_{geo} > 1000$ ) were found in the lower part of the industrial channel. The values of the index of potential ecological risk in the industrial channel changed from low to moderate. The average value of the sludge quality factor shown highly contamination of sludge in the downstream, while in the middle stream the sewage sludge belongs to uncontaminated. A comparative analysis of international standards for acceptable limits of heavy metals in sewage sludge for agricultural use was carried out. The possible uses of sewage sludge accumulated in the industrial channel in the city of Berezniki were assessed. The presence of extremely high concentrations of chlorides and trace elements in sewage sludge limits its recycling. This determines the need to further search for environmentally disposal and recycling routes for the accumulated sewage sludge. The most promising trend of recycling the accumulated sludge from the Berezniki industrial channel may be the development of technologies for the production of construction materials.

### Key words:

wastewater, sewage sludge, toxic trace elements, chloride pollution, industrial channel, Verkhnekamskoe deposit.

The research was supported by the grant no. MK-4377.2022.1.5 from the President of the Russian Federation. The authors are grateful to the Nanomineralogy Sector of the Center for Collective Use of the Perm State University for conducting laboratory analytical studies.

### REFERENCES

1. Zhao Y., Zhuang X., Ahmad S., Sung S., Ni S.-Q. Biotreatment of high-salinity wastewater: current methods and future directions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2020, vol. 36, article number 3737. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02815-4> (accessed 15 December 2022).
2. AlJaberi F.Y., Ahmed S.A., Makki H.F. Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization. *Heliyon*, 2020, vol. 6, Iss. 6, article number e03988. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03988> (accessed 15 December 2022).
3. Ching Y.C., Redzwan G. Biological treatment of fish processing saline wastewater for reuse as liquid fertilizer. *Sustainability*, 2017, vol. 9 (7), article number 1062. Available at: <https://doi.org/10.3390/su9071062> (accessed 15 December 2022).
4. Gotub A., Piekutin J. Pollution of sedimentary ponds at an industrial plant in Janikowo (Poland). *Water*, 2020, vol. 12 (2), article number 536. Available at: <https://doi.org/10.3390/w12020536> (accessed 15 December 2022).
5. Wu D., Hu Y., Liu Y., Zhang R. Review of chloride ion detection technology in water. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11 (23), article number 11137. Available at: <https://doi.org/10.3390/app112311137> (accessed 15 December 2022).
6. *Ekologicheskaya bezopasnost osvoeniya mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Environmental safety of mineral deposit development]. Ed. by E.A. Khayrulina. Perm, Perm State University Publ., 2022. 175 p.

7. Bäche J., Coring E. Biological effects of anthropogenic salt-load on the aquatic fauna: a synthesis of 17 years of biological survey on the rivers Werra and Weser. *Limnologica*, 2011, vol. 41 (2), pp. 125–133. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2010.07.005> (accessed 15 December 2022).
8. Cañedo-Argüelles M., Kefford B.J., Piscart C., Prat N., Schäfer R.B., Schulz C.J. Salinisation of rivers: an urgent ecological issue. *Environmental Pollution*, 2013, vol. 173, pp. 157–167. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.011> (accessed 15 December 2022).
9. Braukmann U., Böhme D. Salt pollution of the middle and lower sections of the river Werra (Germany) and its impact on benthic macroinvertebrates. *Limnologica*, 2011, vol. 41, pp. 113–124. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2010.09.003> (accessed 15 December 2022).
10. Schulz C.J., Cañedo-Argüelles M. Lost in translation: the German literature on fresh water salinization. *Philosophical Transactions the Royal Society B*, 2019, vol. 374, article number 20180007. Available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0007> (accessed 15 December 2022).
11. Kudryashov A.I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley* [Verkhnekamskoe salt deposit]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Epsilon Plyus Publ., 2013. 386 p.
12. Krasilnikova S., Blinov S., Krasilnikov P., Belkin P. World experience using of soda production waste. *Ecology and Industry of Russia*, 2021, vol. 25, no. 12, pp. 48–53. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-48-53> (accessed 15 December 2022).
13. Lepikhin A.P., Miroshnichenko S.A. Tekhnogennoe vozdeystvie Solikamsko-Bereznikovskogo promuzla na poverkhnostnye vodnye obyekty [Technogenic impact of the Solikamsko-Berezniki industrial hub on surface waters]. *Gornyi Zhurnal*, 2008, no. 10, pp. 92–96.
14. Ushakova E.S., Belkin P.A., Baklanov M.A., Drobinina E.V., Puzik A.Yu. Ecological-geochemical and bioindication assessment of the small rivers pollution at the city of Berezniki. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2022, vol. 21, no. 4, pp. 384–393. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.4.375> (accessed 15 December 2022).
15. Schellenberg T., Subramanian V., Ganeshan G., Tompkins D., Pradeep R. Wastewater discharge standards in the evolving context of urban sustainability – the case of India. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, vol. 8, article number 30. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00030> (accessed 15 December 2022).
16. Zhdanov A.F. *Berezniki – gorod uralskikh khimikov* [Berezniki – city of Ural chemists]. Molotov, Molotov Publ. house, 1956. Available at: <https://libking.ru/books/sci-/si-history/1146465-aleksandr-zhdanov-berezniki-gorod-uralskih-himikov.html> (accessed 15 November 2022).
17. *Pravila ispolzovaniya vodnykh resursov Kamskogo i Votkinskogo vodokhranilishch na r. Kame* [Rules for the use of water resources of the Kama and Votkinsk reservoirs on the Kama river]. Federal Agency for Water Resources dated November 7, 2016 No. 255.
18. Penskiy A.V., Kurnosenko V.V., Kasparov S.A. *Sposob ochistki stochnykh vod titano-magniyevogo proizvodstva* [Method of treatment of sewage waters of titanium-magnesium production]. Patent RF, no. 2141456, 1998.
19. Krepysheva I.V., Rudakova L.V., Kozlov S.G. Physicochemical and toxicological properties of slime at soda ash production. *MIAB*, 2015, no. 1, pp. 335–342. In Rus.
20. ITS 8-2015. *Ochistka stochnykh vod pri proizvodstve produktii (tovarov), vypolnenii rabot i okazanii uslug na krupnykh predpriyatiyakh* [Information and Technical Handbook on Best Available Technology ITS 8-2015. Wastewater treatment in manufacture of products (goods), performance of works and provision of services in large enterprises]. Moscow, Buro NDT Publ., 2015. 129 p.
21. ITS 2-2019. *Proizvodstvo ammiaka, mineralnykh udobreniy i neorganicheskikh kislot* [Information and Technical Handbook on Best Available Technology ITS 2-2019. Manufacture of ammonia, fertilizers and inorganic acids]. Moscow, Buro NDT Publ., 2019. 836 p.
22. Kulenova N.A., Akhmetvaliev A.Z.M., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S. Disposal of titanium-magnesium production industrial effluents. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2019, no. 1, pp. 25–33. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-25-33> (accessed 15 December 2022).
23. Meshalkin V.P., Aristov V.M., Shulaev N.S., Bykovskiy N.A. Physicochemical foundations of an energy and resource efficient combined technology for processing of soda ash production wastewater. *Doklady Chemistry*, 2020, vol. 494, no. 1, pp. 145–148. Available at: <https://doi.org/10.31857/S268695352005009X> (accessed 15 December 2022).
24. Myagkaya I.N., Saryg-ool B.Yu., Kirichenko I.S., Gustaitis M.A., Lazareva E.V. Ecogeochemical characteristics of the Yarly-Amry and the Chibitka rivers, located in the dispersion train of Aktash mercury deposit and its wastes (Gorny Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 7–26. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3273> (accessed 15 December 2022).
25. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14, Iss. 8, pp. 975–1001. Available at: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8) (accessed 15 December 2022).
26. Ushakova E.S., Karavaeva T.I., Belkin P.A. Ecological condition of soils in industrial areas (as in the case of Berezniki, Perm region): comparison of Russian and foreign methods of assessment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 58–70. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3273> (accessed 15 December 2022).
27. Wang N., Wang A., Kong L., He M. Calculation and application of Sb toxicity coefficient for potential ecological risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 610–611, pp. 167–174. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.268> (accessed 15 December 2022).
28. Jeong H., Ra K. Investigations of metal pollution in road dust of steel industrial area and application of magnetic separation. *Sustainability*, 2022, vol. 14, article number 919. Available at: <https://doi.org/10.3390/su14020919> (accessed 15 December 2022).
29. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Vaganov S., Perevoshchikov R. Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva Bay, Perm Region (Russia). *Journal of Ecological Engineering*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.12911/22998993/146269> (accessed 15 December 2022).
30. Moskovchenko D., Pozhitkov R., Soromotin A., Tyurin V. The Content and Sources of Potentially Toxic Elements in the Road Dust of Surgut (Russia). *Atmosphere*, 2022, vol. 13 (1), article number 30. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13010030> (accessed 15 December 2022).
31. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river. *GeoJournal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
32. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V. River bottom sediments of technogenic disturbed geosystems of the Eastern Donbas: comparative assessment of pollution level with heavy metals by Russian and international criteria. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 554–564. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2587556621040130> (accessed 15 December 2022).
33. Kowalik R., Gawdzik J., Bak-Patyna P., Ramiaczek P., Jurišević N. Risk analysis of heavy metals migration from sewage sludge of wastewater treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19 (18), article number 11829. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph191811829> (accessed 15 December 2022).
34. Tytla M., Widziewicz-Rzońca K. Heavy metals in municipal sewage sludge – a brief characteristic of potential threats and methods used to assess the ecological risk. *Environment, Earth and Ecology*, 2021, vol. 5 (1), pp. 18–25. Available at: <https://doi.org/10.24051/ee/134276> (accessed 15 December 2022).
35. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, pp. 1217–1232. Available at: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2) (accessed 15 December 2022).
36. Shabanov M.V., Strekulev G.B. Geochemical processes of accumulation of heavy metals in the landscapes of the Southern Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 184–192. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3273> (accessed 15 December 2022).
37. Ingersoll C.G., MacDonald D.D., Wang N., Crane J.L., Field L.J., Haverland P.S., Kemble N.E., Lindskoog R.A., Severn C.,

- Smorong D.E. Predictions of sediment toxicity using consensus-based freshwater sediment quality guidelines. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, vol. 41, pp. 8–21. Available at: <https://doi.org/10.1007/s002440010216> (accessed 15 December 2022).
38. MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, vol. 39, pp. 20–31. Available at: <https://doi.org/10.1007/s002440010075> (accessed 15 December 2022).
  39. Long E.R. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review. *Environmental Science & Technology*, 2006, vol. 40, no. 6, pp. 1726–1736. Available at: <https://doi.org/10.1021/es058012d> (accessed 15 December 2022).
  40. OST 41-05-263-86. *Vody podzemnye. Klassifikatsiya po khimicheskoy sostavu i temperature* [Industry Standard 41-05-263-86. Underground waters. Classification by chemical composition and temperature]. Moscow, VSEGIN GEO Publ., 1986. 9 p.
  41. Guseva T.V. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy: spravochnye materialy* [Hydrochemical indicators of the state of the environment: reference materials]. Moscow, FORUM: INFRA-M Publ., 2007. 192 p.
  42. Yakamercan E., Ari A., Aygün A. Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 319, article number 128568. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128568> (accessed 15 December 2022).
  43. Milik J., Pasela R., Lachowicz M., Chalamoński M. The concentration of trace elements in sewage sludge from wastewater treatment plant in Gniezno. *Journal of Ecological Engineering*, 2017, vol. 18, Iss. 5, pp. 118–124. Available at: <https://doi.org/10.12911/22998993/74628> (accessed 15 December 2022).
  44. Domini M., Bertanza G., Vahidzadeh R., Pedrazzani R. Sewage sludge quality and management for circular economy opportunities in Lombardy. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (20), article number 10391. Available at: <https://doi.org/10.3390/app122010391>
  45. Cheng X., Wei C., Ke X., Pan J., Wei G., Chen Y., Wei C., Li F., Preis S. Nationwide review of heavy metals in municipal sludge wastewater treatment plants in China: Sources, composition, accumulation and risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 437, article number 129267. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129267> (accessed 15 December 2022).
  46. Sharmin S., Mia J., Miah M.S., Zakir H.M. Hydrogeochemistry and heavy metal contamination in groundwaters of Dhaka metropolitan city, Bangladesh: assessment of human health impact. *HydroResearch*, 2020, vol. 3, pp. 106–107. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.10.003> (accessed 15 December 2022).
  47. Perevoshchikov R.D. Naturally occurring radionuclides (40k, 226ra, 232th) in the environment (Verkhnekamskoe deposit of potassium-magnesium salts). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 29–38. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/3/3599> (accessed 15 December 2022).
  48. UNSCEAR. *Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes*. New York, United Nations Publ., 2000. 659 p.
  49. Khisameyeva L.R., Selyugin A.S., Abitov R.N., Busarev A.V., Urmitova N.S. *Obrabotka osadkov gorodskikh stochnykh vod* [Treatment of urban sewage sludge]. Kazan, Kazan. State Architecture-building University Publ. house, 2016. 105 p. Available at: <https://www.kg.asu.ru/upload/iblock/efc/obrabotka-osadkov-gorodskikh-stochnykh-vod.pdf> (accessed 10 November 2022).
  50. *V Sankt-Peterburge dlya utilizatsii osadka stochnykh vod primenyayutsya innovatsionnye tekhnologii* [St. Petersburg uses innovative technologies for sewage sludge disposal]. Available at: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ingen/news/92909/> (accessed 11 November 2022).
  51. *Predstaviteli vodokanala obsudili standarty obrabotki i utilizatsii osadka stochnykh vod so spetsialistami iz Germanii* [Vodokanal representatives discussed sewage sludge treatment and disposal standards with specialists from Germany]. Available at: [http://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/predstaviteli\\_vodokanala\\_obsudili\\_standarty\\_obrabotki\\_i\\_utilizatsii\\_osadka\\_stochnykh\\_vod\\_so\\_spetsialistami\\_iz\\_germanii/](http://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/predstaviteli_vodokanala_obsudili_standarty_obrabotki_i_utilizatsii_osadka_stochnykh_vod_so_spetsialistami_iz_germanii/) (accessed 11 November 2022).
  52. *EPA Basic Information about Biosolids*. Available at: <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-biosolids> (accessed on 17 June 2022).
  53. Vaithyanathan V.K., Cabana H. Integrated biotechnology management of biosolids: sustainable ways to produce value – added products. *Frontiers in Water*, 2021, vol. 3, article number 729679. Available at: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.729679> (accessed 15 December 2022).
  54. *Eurostat. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater*. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/water> (accessed on 6 September 2022).
  55. Collivignarelli M.C., Abbà A., Frattarola A., Carnevale Miino M., Padovani S., Katsoyiannis I., Torretta V. Legislation for the reuse of biosolids on agricultural land in Europe: overview. *Sustainability*, 2019, vol. 11 (21), article number 6015. Available at: <https://doi.org/10.3390/su11216015> (accessed 15 December 2022).
  56. Zabielska-Adamska K. Bottom ash characteristics and potential application in road embankment. *Sustainability*, 2020, vol. 12 (1), article number 39. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12010039> (accessed 15 December 2022).
  57. Wei L., Zhu F., Li Q., Xue C., Xia X., Yu H., Zhao Q., Jiang J., Bai S. Development, current state and future trends of sludge management in China: based on exploratory data and CO<sub>2</sub>-equivalent emissions analysis. *Environment International*, 2020, vol. 144, article number 106093. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106093> (accessed 15 December 2022).
  58. Tang C.-W., Cheng C.-K. Sustainable use of sludge from industrial park wastewater treatment plants in manufacturing lightweight aggregates. *Materials*, 2022, vol. 15 (5), article number 1785. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15051785> (accessed 15 December 2022).
  59. Luo Y., Bao S., Yang S., Zhang Y., Ping Y., Lin C., Yang P. Characterization, spatial variation and management strategy of sewer sediments collected from combined sewer system: a case study in Longgang District, Shenzhen. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, vol. 18 (14), article number 7687. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph18147687> (accessed 15 December 2022).
  60. Rosiek K. Directions and challenges in the management of municipal sewage sludge in Poland in the context of the circular economy. *Sustainability*, 2020, vol. 12 (9), article number 3686. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12093686> (accessed 15 December 2022).
  61. Duan B., Feng Q. Risk assessment and potential analysis of the agricultural use of sewage sludge in Central Shanxi Province. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19 (7), article number 4236. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph19074236> (accessed 15 December 2022).
  62. Li Y., Fang Z., Teng W., Shen S., Li R. Comprehensive evaluation of the control efficiency of heavy-metal emissions during two-step thermal treatment of sewage sludge. *ACS Omega*, 2020, vol. 38 (5), pp. 24467–24476. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02939> (accessed 15 December 2022).
  63. Sidorova I.T. Formation of chemical industry in Verkhnekamye by the example of Bereznikochemical plants. *Bulletin of Moscow Region State University. Series: History and Political Sciences*, 2010, vol. 2, pp. 80–83. In Rus. Available at: <https://www.istpolitmgou.nu/jour/article/view/1165> (accessed on 15 November 2022)
  64. Blinov S.M., Menshikova E.A. Utilisation the industrial wastes in Perm region. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 179–191. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.2.179> (accessed 15 December 2022).

Received: 23 December 2022.

Reviewed: 3 March 2023.

#### Information about the authors

**Evgeniya S. Ushakova**, junior researcher, Perm State University.

**Pavel A. Belkin**, Cand. Sc., researcher, Perm State University.

**Elena V. Drobinina**, Cand. Sc., associate professor, Perm State University.

УДК 528.88:528.77: 551.24

## КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ПО ДАННЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА ЧАЙВО-ДЕ-КАСТРИ)

Купцова Олеся Витальевна<sup>1</sup>,  
Korsuncevaolesy@gmail.com

Мелкий Вячеслав Анатольевич<sup>2</sup>,  
vamelkiy@mail.ru

Верхотуров Алексей Александрович<sup>2</sup>,  
ussr-91@mail.ru

Долгополов Даниил Валентинович<sup>3</sup>,  
d-daniil@yandex.ru

<sup>1</sup> Сахалинский государственный университет и РАН,  
Россия, 634008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290.

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук,  
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

<sup>3</sup> ЗАО «Ай Ко»,  
Россия, 109004, г. Москва, Большой Дровяной пер., 8, стр. 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью учета опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации трубопроводов. Российская Федерация занимает второе место в мире по общей протяженности магистральных трубопроводов, на которых иногда возникают аварии в результате негативного воздействия природных и техногенных факторов. Основными опасными геологическими процессами, оказывающими воздействие на трубопроводы, являются смещения в зонах активных разрывных нарушений в земной коре. Диагностика на наличие разломных зон территории, планируемой для строительства линейных сооружений, выявляет потенциально опасные участки, на которые следует обратить пристальное внимание, организовать постоянный мониторинг в местах возможных подвижек грунтовых масс. Исследования из экономических соображений целесообразно проводить с помощью данных дистанционного зондирования Земли, а для обработки данных использовать современные геоинформационные продукты. Мониторинг с помощью дистанционного зондирования позволяет быстро оценить меняющиеся инженерно-геологические условия на территориях, где проложен трубопровод, а также обнаружить признаки возникновения природных процессов, представляющих опасность для объектов инфраструктуры. Мониторинг коридоров трасс магистральных трубопроводов необходимо проводить всеми доступными средствами во время строительства и эксплуатации. Работа с программным обеспечением ArcGIS, QGIS и LEFA в сочетании с геофизическими данными, предоставляемыми «Единой геофизической службой РАН», позволяют оценить сейсмическую активность, её интенсивность и характер взаимосвязи с разрывными нарушениями.

**Цель:** определить и показать на карте наиболее опасные участки с активными разломными зонами, представляющими потенциальную угрозу негативного воздействия на трубопровод во время эксплуатации.

**Объект:** космические снимки коридора трассы магистрального трубопровода для выявления разрывных нарушений сейсмогенного характера, карты эпицентров землетрясений, выявленных ранее вблизи трассы трубопровода.

**Методы:** дешифрирование спутниковых изображений, методы геоинформационного моделирования, картографирования, статистические методы, методы автоматизированного линейного анализа, методы для изменения разрешения, размера и обзорности снимков без потери качества информации, такие как методы интерполяции и агрегирования, пространственный анализ взаимозависимости зон разрывных нарушений и землетрясений, компиляция геоинформации.

**Результаты.** Проведен анализ геологической, геофизической и спутниковой информации исследуемой территории; обработка данных дистанционного зондирования территории, на которой расположен интересующий участок трубопровода; автоматизированный линейный анализ изображений различного спектрального диапазона и разрешения с целью выявления наиболее вероятных зон разрывных нарушений; оценка сейсмической активности исследуемой территории на основе геофизических данных. Определены и представлены на карте потенциально опасные районы исследуемой территории магистрального трубопровода, характеризующиеся зонами разрывных нарушений и повышенной сейсмической активностью.

### Ключевые слова:

Мониторинг земель, космические снимки, трубопроводная система, землетрясение, разломы, риск, геоинформационное картографирование, геодезическая привязка, QGIS, LEFA.

### Введение

Большое геополитическое значение для России имеет освоение дальневосточной окраины: этому процессу всегда уделялось значительное внимание.

Освоение новых месторождений углеводородного сырья выдвигает в число первоочередных стратегических задач развитие сети магистральных трубопроводов в районах Сибири и Дальнего Востока. Обеспечение безопасности при строительных работах и экс-

платации линейной части трубопроводов требует их регулярного обследования и разработки методов моделирования взаимодействия трубопровода и геологических процессов. К серьёзным экологическим и технологическим последствиям, а также экономическим потерям могут привести выходы из строя оборудования или повреждения трубопровода, вызванные природными процессами или технологическими сбоями.

Выполнение мониторинга геологических условий территории, по которой прокладывают трубопроводы, традиционно основывается на обычных полевых геологических и геодезических измерениях. Традиционные методы являются достаточно высокоточными, однако они охватывают сравнительно небольшую площадь, требуют привлечения существенных трудовых и финансовых ресурсов. Космические методы обладают преимуществами, главными из которых являются целостное представление о территории исследований, возможность получения информации об изменениях природных условий на труднодоступных участках трубопроводов, оперативность и актуальность поступления данных, а также возможность фиксации явлений и процессов, недоступных для исследования другими методами или требующих больших временных и трудовых затрат. Дистанционное зондирование позволяет обнаруживать активизацию зон разрывных нарушений, представляющих опасность для трубопроводных систем, и осуществлять количественную и качественную оценку риска. Методы дешифрирования космических снимков территорий с магистральными трубопроводами, а также вопросы моделирования воздействий природных процессов на трубопроводные системы рассматриваются в статьях В.Г. Аковецкого, В.Г. Бондура, А.Т. Зверева, А.П. Карпика, В.А. Малинникова, В.А. Мелкого, А.В. Комиссарова, В.С. Хоршилова, Д.В. Долгополова, L.F. Balogun, A.S. Galakhar, E. Mercante, W. Zirrig, G. Schreier, W.E. Roper и др. [1–15].

Блоки земной коры в геодинамически активных структурных зонах нередко смещаются относительно друг друга. В зоне, приближенной к плоскости контакта, наблюдается активизация разломов, внешние ее проявления наблюдаются на поверхности территории. В таких условиях часто наблюдается поднятие или проседание грунта, что может происходить в непосредственной близости или при пересечении разломной зоной участков трубопроводов. Смещения грунта даже на несколько сантиметров могут представлять большую опасность для трубопроводов. Увеличение внешней нагрузки на конструкцию трубы может привести к повреждению целостности трубопровода с утечкой нефтепродуктов. Общая цель наблюдений на исследуемом участке трубопровода сводится в количественной оценке смещений в зоне разрывных нарушений. Благодаря мониторингу получают данные для оценки геологической опасности для трасс трубопроводов, которая дает возможность спланировать мероприятия для минимизации риска при негативных воздействиях на трубу. Определение

величины и скорости смещений по разлому, вызывающих деформации трубы, необходимо проводить по данным высокоточных измерений, которые могут производиться как традиционными геодезическими методами, так и с использованием данных интерферометрического радара с постоянным рассеянием и синтезированной апертурой (PS-InSAR). Результаты вычислений позволяют дать точную оценку геологических опасностей и определить комплекс превентивных мер для обеспечения безопасной эксплуатации трасс нефте- и газопроводов [16].

Объектом настоящих исследований послужили космические снимки коридора трассы магистрального трубопровода и цифровые модели рельефа SRTM, которые использовались для выявления разрывных нарушений сейсмогенного характера с помощью линейного анализа, карты местоположения эпицентров землетрясений, выявленных ранее вблизи трассы трубопровода.

Предмет исследования – методика дешифрирования с помощью линейного анализа. Статистическая обработка линейных элементов исследуемой территории проводилась на основе выявления преобладающих направлений штрихов и линейных элементов. В результате проведенного анализа выявлены дизъюнктивные нарушения исследуемой территории, по которой проложен трубопровод и построена карта разломов.

#### Материалы и методы исследования

Для проведения линейного анализа были выбраны снимки, полученные в результате съемок со спутника Landsat-8, и данные Shuttle Radar Topography Mission SRTM. Исходные данные получены с вебсайта Геологической службы США, где они размещены в свободном доступе [17].

Данные радарной топографической модели SRTM получены благодаря съемкам, которые были выполнены при реализации проекта по сбору данных в феврале 2000 г. На космическом корабле Endeavour для выполнения съемки были установлены две радиолокационные антенны SIR-C/X-SAR и X-Band Synthetic Aperture Radar. Более крупного сооружения в космосе пока ещё не было: длина антенны составляла 60 м. Различие во времени поступления сигналов на разные антенны позволило с применением фазово-когерентных датчиков получить большое количество высокоточной информации о рельефе земной поверхности. В результате обработки и редактирования первых данных получена модель SRTM Void Filled с разрешением 1–3 угловых секунды, что соответствует разрешению от 30 до 90 м. Точность высоты в модели составляет 1 м. Информация в модели представлена в виде данных о высотном отклонении точек земной поверхности относительно эллипсоида WGS84 [18].

Данные космических съемок Landsat-8 и SRTM скачивались с вебсайта в формате GeoTIFF (TIFF с географической привязкой). Данные снимка Landsat 8 содержат три дополнительных атрибутивных файла, несущих информационную нагрузку о поверхностных, атмосферных и сенсорных характеристиках [19]. Первый уровень обработки снимка включает в себя

оценку точности позиционирования, влияния отражения электромагнитных волн от поверхности Земли (LaSRC), данные об отражательной способности поверхности, рассеивающей способности атмосферы [20]. Последующая обработка проводилась непосредственно перед началом дешифрирования.

Линеamentный анализ выполнялся с помощью программного комплекса LEFA [21]. Работа с данными SRTM и Landsat позволила выявить дизъюнктивные нарушения исследуемой территории. Изображения поверхности обрабатывались с помощью операции бинарно-морфологической эрозии для детектирования границ, а также посредством выполнения действий по математическим алгоритмам Кэнни с дальнейшими преобразованиями Хафа [22].

Основной операцией выделения границ в математической морфологии была эрозия. Объекты изображения представлены в виде множества  $A$  всех фоновых точек-пикселей. Для того чтобы выделить необходимые объекты обрабатываемого изображения, используется структурный элемент  $B$ , описывающий область определенной формы, которую следует выявлять. Эрозия обрабатываемого изображения  $A$  по структурному элементу  $B$  – это множество всех точек  $z$ , при попадании в которые элемент  $B$  полностью содержится в множестве  $A$ .

$$A \ominus B = \{z | (B)z \subseteq A\},$$

где  $A \in Z^2$ ,  $B \in Z$  [23, 24].

В результате эрозии на изображении удаляются все граничные точки, имеющие не менее одного фонового пикселя в своем окружении. Границу на изображении определяют путем вычитания из исходного изображения площади, полученной в результате эрозии.

Дальнейшая обработка изображения в программе PyLEFA выполняется посредством преобразований Хафа, что позволяет представить линейные элементы рельефа в виде штрихов. Трансформация Хафа предназначена для упрощения группировки граничных точек в наборы с определенными параметрами. Прямую можно задать либо уравнением  $y = kx + b$ , либо в виде

$$y = \left(-\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right)x + \left(\frac{r}{\sin \theta}\right).$$

Через любую точку на плоскости может проходить бесконечно много прямых. Так, для точки с координатами  $(x_0, y_0)$  это будут прямые, описываемые уравнением

$$r(\theta) = x_0 \times \cos \theta + y_0 \times \sin \theta,$$

где  $r$  – расстояние от начала координат до ближайшей точки на прямой;  $\theta$  – угол между осью  $x$  и линией, соединяющей начало координат с ближайшей точкой.

Ряд точек, которые формируют прямую линию, определяют синусоиды, которые пересекаются в точке параметров  $(r_0, \theta_0)$  для этой линии. Поэтому обнаружение коллинеарных точек сводится к обнаружению пересекающихся кривых. На изображении, выстроенном в полярных координатах, достаточно выбрать наиболее крупные пятна для обнаружения соответствующих прямых [25, 26].

Пространственно-ориентированную информацию целесообразно аккумулировать и обрабатывать, создавая геопространственные модели с помощью геоинформационных технологий [27–29]. Структура информации в системах, создаваемых с применением методологии Digital Earth, может опираться на современные представления о географической дифференциации природной среды [30–34]. Достаточно эффективными для обработки данных аэрокосмических съемок являются комплексы программного обеспечения ArcGIS и QGIS. Работа с данными во время исследований проводилась в геоинформационном проекте, созданном для территории Северного Сахалина.

#### Результаты исследования и их обсуждение

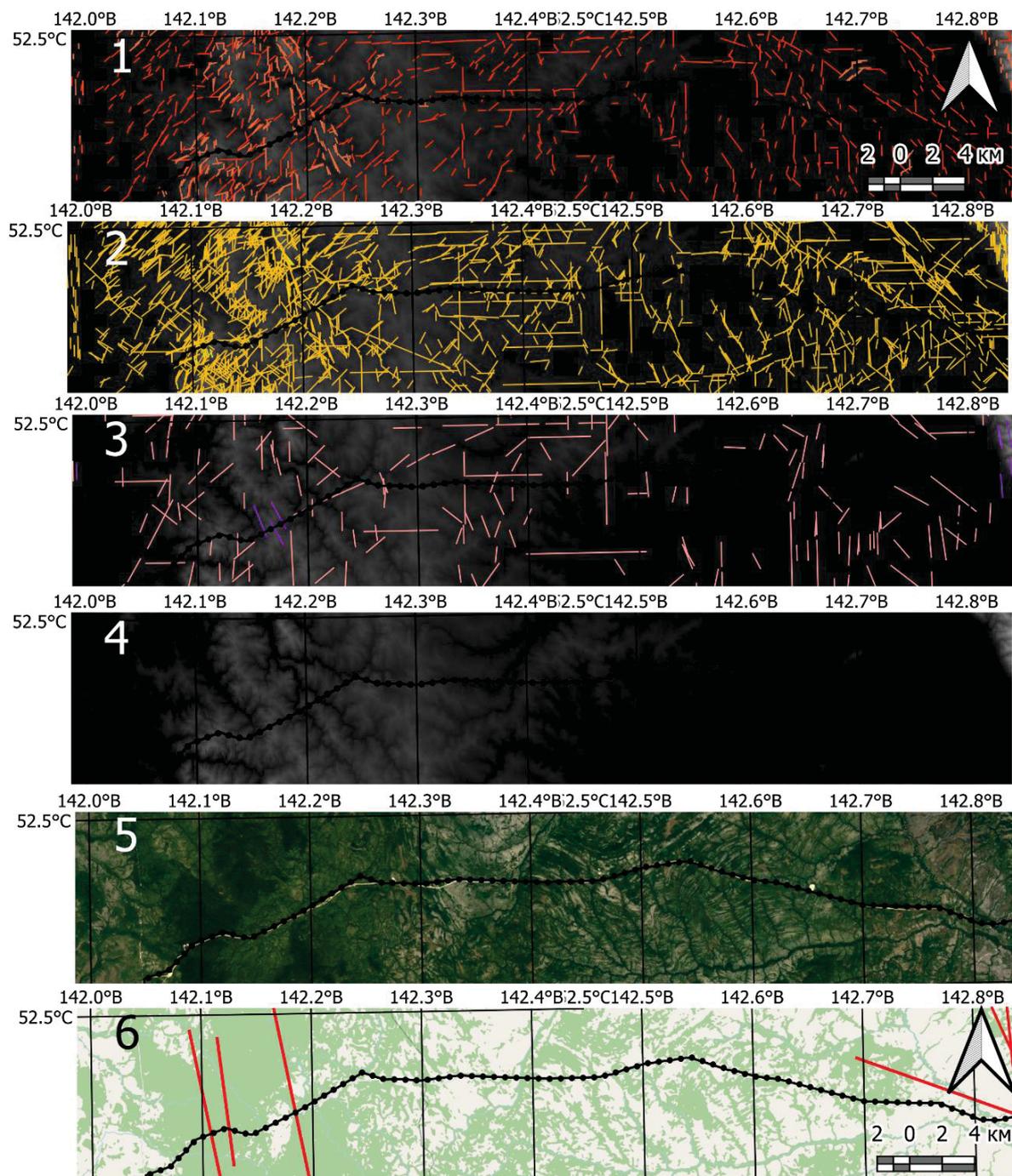
Исследования проводились на участке магистрального газопровода Чайво–Де-Кастри, который изучался также нами ранее [35]. Территорию Северного Сахалина, по которой проходит участок трубопровода, пересекают многочисленные разломы [36–39], к которым зачатую приурочены проявления опасных геологических процессов. Смещения по разлому сопровождаются землетрясениями, которые происходят в местах, где превышен предел прочности пород и происходит разрядка накопленных напряжений [40, 41]. Землетрясения в зонах разрывных нарушений вызывают триггерные эффекты, которые способствуют активизации гравитационных склоновых процессов, что приводит к разрушениям объектов промышленного, гражданского строительства и транспортных линейных сооружений, в том числе трубопроводов [42–44].

Анализ геологических условий территории, по которой проходит трубопровод Чайво–Де-Кастри, выполненный с помощью методов геоинформационного моделирования, показал возможность обнаружения проявлений разрывной и трещинной тектоники, способной влиять на процессы строительства и эксплуатации трубопроводов, по данным аэрокосмических съемок. Использование методики линеamentного анализа спутниковых изображений, хорошо зарекомендовавшей себя ранее [45–47], позволило выявить зоны разломов, которые не были обнаружены ранее другими методами.

Анализ данных SRTM посредством операции бинарно-морфологической эрозии и с помощью математических алгоритмов Кэнни с дальнейшей цифровой обработкой посредством преобразований Хафа позволил обнаружить дизъюнктивные нарушения на территории Северного Сахалина (рис. 1).

Разломные зоны образуют две планетарные системы: ортогональную (тянутся в меридиональном или в широтном направлении) и диагональную (вытянуты с северо-запада на юго-восток или северо-востока на юго-запад). При этом на платформах распространена диагональная система, а в подвижных поясах – по простиранию тектонических структур [48]. В зависимости от уровня генерализации изображения зоны разломов относят к различному уровню значимости: планетарному (трансрегиональному), региональному, субрегиональному и локальному [49].

Разрывные нарушения различного масштаба и разломы относят к определенному рангу в зависимости от протяженности: 1 ранг – от нескольких до сотни метров, 2 ранг – от сотни метров до километра, 3 ранг – от 1 до 35 км, 4 ранг – от 35 до 100 км, 5 ранг – более 100 км [50].



**Рис. 1.** Разрывные нарушения, выявленные при помощи линейментного анализа на севере Сахалина, в районе расположения магистрального трубопровода Чайво–Де-Кастри при использовании различных алгоритмов: 1 – Erosion many; Canny many; 2 – Erosion medium; Canny medium; 3 – Erosion small; Canny small; 4 – данные SRTM; 5 – данные Google Satellite Hybrid по материалам съемки Landsat; 6 – участок трубопровода с выделенными разломами

**Fig. 1.** Faults identified by lineament analysis in the north of Sakhalin, in the area of the Chayvo–De-Kastri main pipeline using various algorithms: 1 – Erosion many; Canny many; 2 – Erosion medium; Canny medium; 3 – Erosion small; Canny small; 4 – SRTM data; 5 – Google Satellite Hybrid data based on Landsat survey data; 6 – section of the pipeline with marked faults

Автоматизированное дешифрирование изображений территории, по которой проходит трубопровод, позволило определить местоположение дизъюнктивных дислокаций (рис. 2).

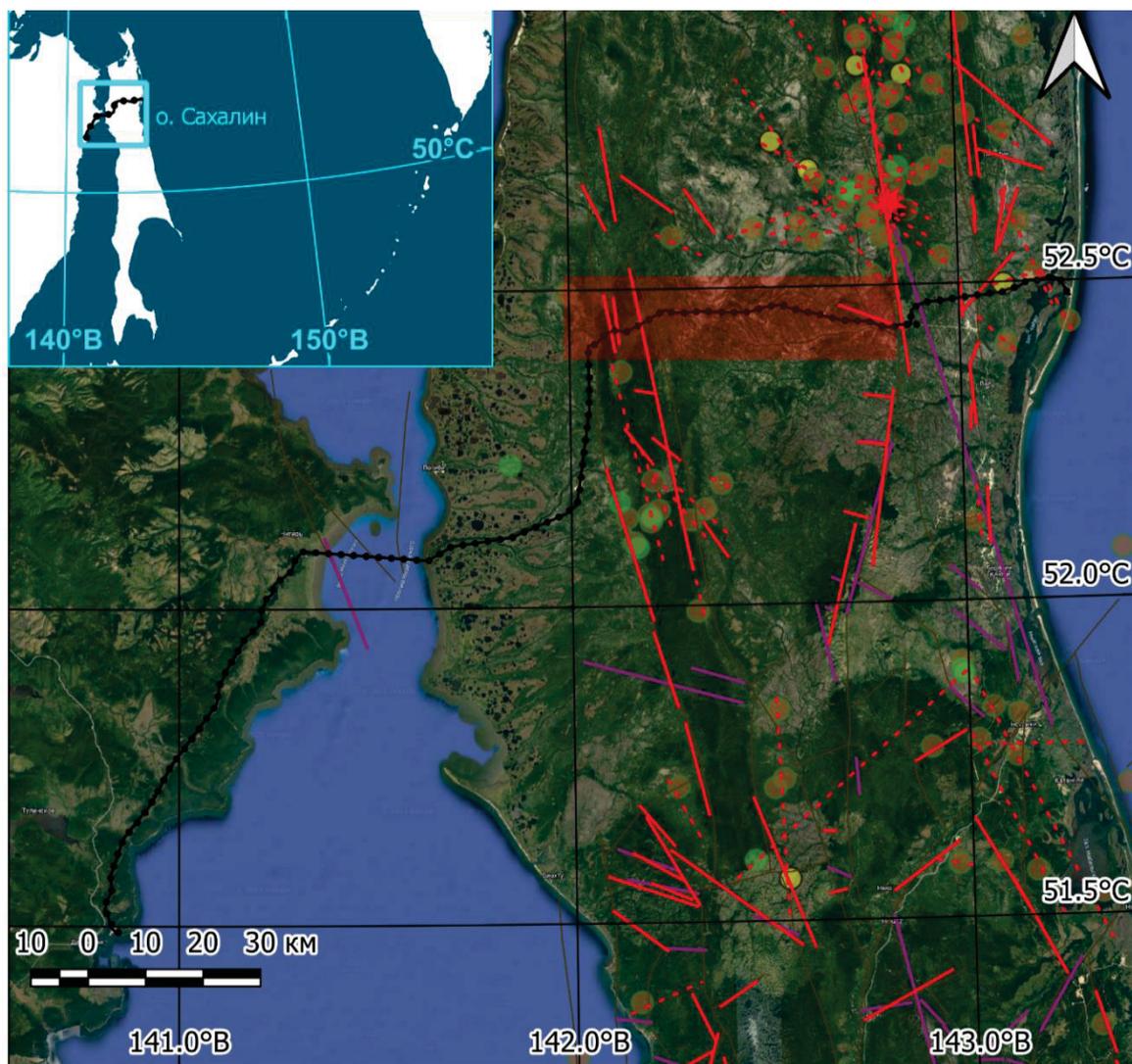


Рис. 2. Схема расположения магистрального трубопровода и разломов, выявленных на исследуемой территории (розовый прямоугольник) по космическим снимкам

Fig. 2. Layout of the main pipeline and the identified faults in the research area (pink rectangle) by space images

Таблица. Разломы исследуемой территории, выделенные в различных режимах программы LEFA с использованием [36, 38, 51–53]

Table. Faults of the research area, identified in various modes of the LEFA program using [36, 38, 51–53]

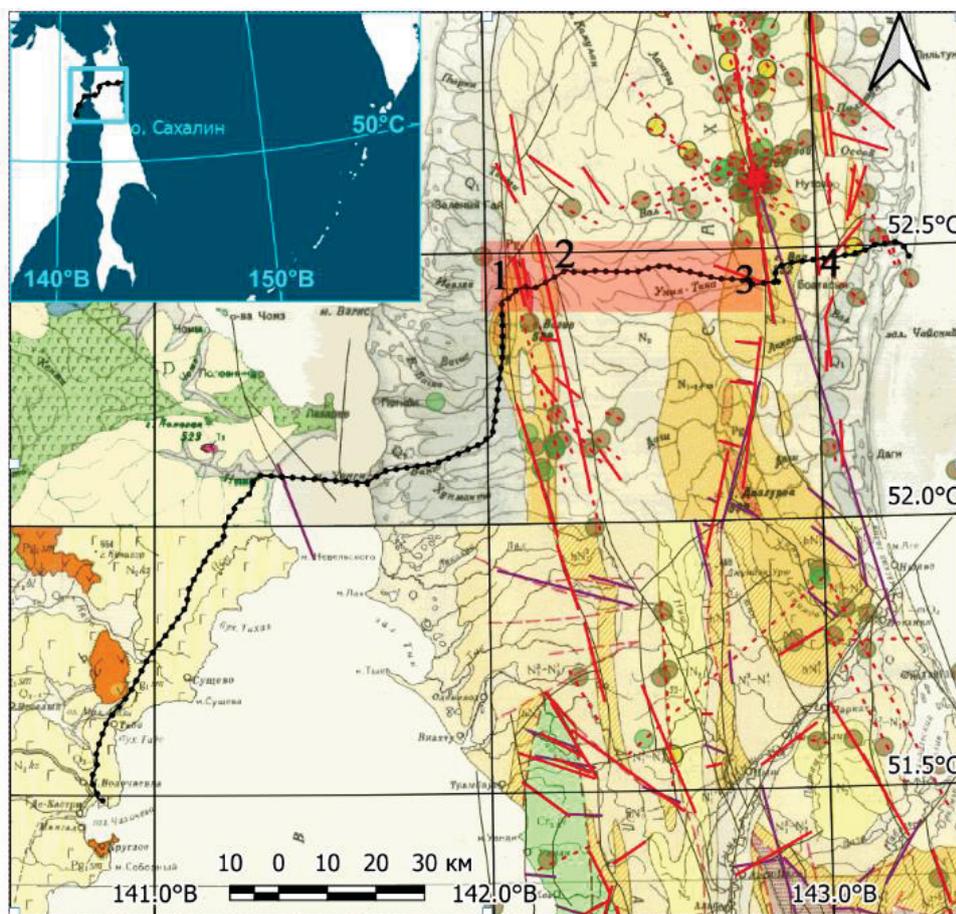
Название разлома Fault name	Режим выделения Selection mode	Другие источники информации о разломе Other sources of information about the fault
Центрально-Сахалинский (Западно-Энгизпальский сегмент) West Sakhalin (West-Engizpal segment)	erosion medium	[38, 52, 53]
Центрально-Сахалинский (Восточно-Энгизпальский сегмент) Central Sakhalin (East-Engizpal segment)	erosion small, medium	[52, 53]
Хоккайдо-Сахалинский (Гыргыляньи-Дагинский сегмент) Hokkaido-Sakhalin (Gyrgylanyi-Dagi segment)	Canny medium	[36, 38, 52, 53]
Эхаби-Паромайский (южная Гаромайская ветвь) Ehabi-Paromaiian (south Garomai branch)	erosion small, Canny many	[36, 38, 51]
Вал-Лангрыйский Val-Langry fault	Canny many	[36, 51]

Большую часть исследуемой территории занимают блоки земной коры Центрально-Сахалинского синклиория, Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского антиклинориев. При автоматизированном дешифрировании выделены разломные зоны меридионального простирания: Хоккайдо-Сахалинская (Гыргыляньи-Дагинский сегмент), Центрально-Сахалинская, представленная дву-

мя сегментами (Западно-Энгизпальским и Восточно-Энгизпальским), а также Эхаби-Паромайская (южная Гаромайская ветвь) (таблица). Кроме того, на исследуемой территории выделено большое количество локальных разломов 1–3 ранга. Среди них выделяется Вал-Лангрыйский разлом 3 ранга диагонального простирания, ориентированный с северо-запада на юго-восток.

Гряды низкогорных денудационных останцев гор Вагис, которые являются структурным продолжением Западно-Сахалинских гор, ограничены с запада и востока ветвями Центрально-Сахалинского разлома – Западно-Энгизпальским и Восточно-Энгизпальским сегментами. В плане разломные зоны представляют собой ряд субпаралельных нарушений. Видимая ширина зон достигает нескольких сотен метров. Характерными особенностями зон разломов являются большая протяжённость, значительная глубина заложения и длительность развития. Падение плоскости смесителя у Западно-Энгизпальского разлома восточное под углом 70–85 градусов, у Восточно-Энгизпальского – западное под углом 55–70 градусов. Разломы ограничивают узкое протяжённое горстовое поднятие, сложенное более древними породами, чем окружающие.

Гаромайская зона разломов (южное продолжение Эхаби-Паромайской), которая выражена в рельефе грядой складчатых форм шириной около 5 км, включает ряд субмеридиональных разрывов сдвигового типа. Горизонтальные смещения крыльев относительно друг друга после Нефтегорского землетрясения были незначительными, так как все пункты наблюдения по обе стороны от разломной зоны сместились на юго-запад на величину около 1 м [52]. Осевая часть гряды положительных форм, а также земная поверхность восточнее разломной зоны поднялись на высоту до 20 см во время землетрясения. Западнее гряды отмечена субмеридиональная зона опусканий на несколько меньшую высоту. На обоих бортах разлома, за исключением разломной зоны шириной 25 м, по данным исследований методом преломленных волн наблюдается субгоризонтальное залегание слоев [52].



Условные обозначения

разломы	землетрясения
— разломы по снимкам	★ mag 7-8
— разломы	● mag 5-5,9
- - - разломы по рельефу и землетрясениям	● mag 4-4,9
— геологическая карта	● mag 3-3,9

Рис. 3. Магистральный трубопровод Чайво-Де-Кастри и зоны разломов на геологической карте. Цветами выделены зоны разломов: черным – отмеченные ранее на геологических картах, фиолетовым – выявленные по данным космических снимков, красным – выявленные по данным SRTM

Fig. 3. The main pipeline Chayvo-De-Kastri and fault zones on the geological map. Fault zones are selected in colors: black – previously marked on geological maps, purple – identified according to satellite imagery, red – identified according to SRTM data

Гыргыланьи-Дагинский сегмент Хоккайдо-Сахалинский разломной зоны представлен серией разломов, по которым произошли правосторонние сдвиги пунктов, расположенных на восточном крыле, относительно пунктов западного крыла на 80 см. Смещения по разлому носили взбросо-надвиговый характер. После Невтегорского землетрясения наблюдался небольшой наклон земной поверхности вдоль разломной зоны к северу около 20 см [52].

Разломы субширотной системы прерывают разломы субмеридиональной системы или сами прерываются ими, что привело к формированию мелкоблочного структурного плана исследуемой территории. Обычно эти разломы являются сбросами, сбросо-сдвигами и сдвигами и имеют небольшую протяженность.

Таким образом, системы разломов обусловили сложное складчато-блоковое строение территории, в пределах которой в той или иной степени проявляются черты унаследованности: крупные антиклинальные структуры соответствуют выступам «фундамента», а синклиналильные зоны – понижениям. Однако мощная толща неоген-четвертичных отложений и значительная глубина залегания «фундамента» существенно завуалировали проявления унаследованности у относительно мелких структур. К тому же многие из них, особенно меридионального простирания, образовались гораздо позже и являются наложенными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аковецкий В.Г. Аэрокосмический мониторинг месторождений нефти и газа. – М.: Недра, 2008. – 454 с.
2. Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В., Ильченко А.А. Аэрокосмический мониторинг в задачах оценки геоэкологических рисков аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Вычислительные технологии. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 72–85.
3. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / В.Г. Бондур, В.П. Гаврилов, П.Г. Терещенко и др. / под ред. В.Г. Бондура. – М.: Научный мир, 2012. – 556 с.
4. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.
5. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линейных элементов // Исследования Земли из космоса. – 2005. – № 3. – С. 37–52.
6. Дедкова В.В., Комиссаров А.В. Анализ методов и средств контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 77–84.
7. Безопасность России. Безопасность трубопроводного транспорта: Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты / под науч. ред. И.И. Мазур, О.М. Иванцова, С.П. Ансова. – М.: МГФ «Знание», 2002. – 750 с.
8. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. – М.: ИЦ Елма, 2004. – 1104 с.
9. Хорошилов В.С., Комиссаров А.В., Кобелев А.Н. Математическое моделирование деформационных процессов основного технологического оборудования камеры приема и пуска средств очистки и диагностики магистрального трубопровода // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 3. – С. 36–43.
10. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. – М.: Газойл пресс, 2003. – 352 с.
11. Balogun L.F., Matori A.N., Lawal D.U. Geovisualization of subsurface pipelines: a 3D approach // Modern Applied Science – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 158–165.

#### Заключение

Выявление разломов на территории, пересекаемой магистральным трубопроводом Чайво–Де-Кастри с помощью автоматизированного дешифрирования данных космических съемок, позволило получить целостное представление о характере деформаций земной коры на территории исследований. Возможность получения информации об изменениях природных условий на труднодоступных участках трубопроводов, оперативность и актуальность поступления данных, а также возможность фиксации явлений и процессов, недоступных для исследования другими методами или требующих больших временных и трудовых затрат, позволили обнаружить зоны разрывных нарушений, представляющих опасность для трубопроводных систем.

На территории установлены главные региональные разломные зоны меридионального простирания (первого порядка или 5 ранга): Хоккайдо-Сахалинская (Гыргыланьи-Дагинский сегмент), Центрально-Сахалинская, представленная двумя сегментами (Западно-Энгизпальским и Восточно-Энгизпальским), а также Эхаби-Паромайская (южная Гаромайская ветвь), которую можно отнести к 4 рангу (таблица). Кроме того, на исследуемой территории выделено большое количество мелких разломов 1–3 ранга.

12. Galakhar A.S. About application of NURBS to monitoring of operational risk of long distance pipelines // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. – 2018. – V. 1141. – № 1. – 012083.
13. Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems // Acta Scientiarum. Technology. – 2010. – V. 32. – № 2. – P. 171–178.
14. Roper W.E., Dutta S. Remote sensing and GIS applications for pipeline security assessment // ESRI User Conference Proceedings. Report. – San Diego. URL: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap1762.pdf> (дата обращения 22.07.2022).
15. Zirnig W., Hausamann D., Schreier G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines // Earth Observation Magazine. – 2002. – № 11. – P. 12–17.
16. Bayramov E., Buchroithner M.F., Kada M. Radar remote sensing to supplement pipeline surveillance programs through measurements of surface deformations and identification of geohazard risks // Remote Sensing. – 2020. – V. 23. – № 12. – 3934.
17. Landsat Missions. Website United States Geological Survey (USGS). URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (дата обращения 22.07.2022).
18. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled // GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey). URL: <https://glovis.usgs.gov/aP> (дата обращения 22.07.2022).
19. Landsat Quality Assessment ArcGIS Toolbox // United States Geological Survey (USGS) website. URL: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox> (дата обращения 22.07.2022).
20. Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Identification of disjunctive dislocations as one of the parameters for estimating a territory seismicity of North Sakhalin // 4<sup>th</sup> GeoProNH. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 10. – 012003.
21. Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.
22. Купцова О.В., Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Картографирование разломов на территории Северо-Сахалинской равнины по данным дистанционного зондирования земли // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого раз-

- вия территории: Материалы Междунар. конф. – М: Географический факультет МГУ, 2021. – Т. 27. – Ч. 1. – С. 317–329.
23. Canny J.F. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – V. 8. – P. 679–698.
24. Xue L.-Y., Pan J.-J. Edge detection combining wavelet transform and canny operator based on fusion rules // IEEE. 2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. – 2009. – P. 324–328.
25. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes // Pattern Recognition. – 1981. – V. 13. – № 2. – P. 111–122.
26. Кудрина М.А. Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 4 (2). – С. 476–478.
27. Долгополов Д.В. Теоретические основы информационного обеспечения эксплуатации магистральных трубопроводов аэрокосмической информацией // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52). – С. 60–64.
28. Карпик А.П., Жарников В.Б. О взаимодействии наук о Земле в развитии нефтегазового комплекса страны // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27. – № 2. – С. 173–183.
29. Сизов А.П. Локальный мониторинг земель в регионе как инструмент управления земельными ресурсами и сохранения средоформирующего потенциала территории // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2021. – № 4 (168). – С. 43–49.
30. Карпик А.П., Мусихин И.А., Ветошкин Д.Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 155–163.
31. Геоинформационная поддержка принятия решений по использованию энергетических ресурсов Сахалина / В.А. Мелкий, И.Н. Тикунова, Е.Н. Ерёмченко, О.Ю. Черешня, Х. Фукуи, С. Марта, Я. Тахджана // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 132–143.
32. Геосистемы Дальнего Востока России на рубеже XX–XXI веков: в 3-х т. / под ред. академика П.Я. Бакланова. Т. 1. Природные геосистемы и их компоненты. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 428 с.
33. 3D geodynamic models for the development of opposing continental subduction zones: The Hindu Kush-Pamir example // J. Liao, T. Gerya, M. Thielmann, A.A.G. Webb, S.-K. Kufner, A. Yin // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – V. 480. – P. 133–146.
34. Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital Earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables // Big Earth Data. – 2021. – V. 5. – № 4. – P. 476–496.
35. Долгополов Д.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Геоинформационное обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 52–63.
36. Деформации земной поверхности в эпицентральной зоне Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. / Н.Ф. Василенко, А.И. Иващенко, Ким Чун Ун, М. Касахара, Х. Такахаши, Ф. Кимата // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана / отв. ред. А.И. Иващенко. – Южно-Сахалинск: ИМГиТ ДВО РАН, 2001. – Т. 1. – С. 39–57.
37. Купцова О.В., Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Выявление зон дизъюнктивных дислокаций для территории Северного Сахалина по данным космических съемок // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 4. – № 1. – С. 79–85.
38. Патрикеев В.Н., Ломтев В.Л. Разломы Северного Сахалина: особенности строения и сейсмическая опасность // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 3. – С. 44–58.
39. Active faults and paleoseismology in northeastern Sakhalin II / H. Tsutsumi, A. Kozhurin, M.I. Streltsov, T. Ueki, Y. Suzuki, M. Watanabe // Journal of Geography. – 2000. – V. 109. – № 2. – P. 294–301
40. Experimental study of observable deformation process in fault meta-instability state before earthquake generation / Y. Guo, Y. Zhuo, P. Liu, Sh. Chen, J. Ma // Geodynamics & Tectonophysics. – 2020. – V. 11. – № 2. – P. 417–430.
41. Rupture propagation along Steppovers of strike-slip faults: effects of initial stress and fault geometry / H. Wang, M. Liu, B. Duan, J. Cao // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2020. – V. 110. – № 3. – P. 1011–1024. URL: <https://doi.org/10.1785/0120190233> (дата обращения 22.07.2022).
42. Landslides triggered by the 2004 Niigata Ken Chuetsu, Japan, Earthquake / D.S. Kieffer, R. Jibson, E.M. Rathje, K.I. Kelson // Earthquake Spectra. – 2006. – V. 22 (S 1). – P. 47–73.
43. Fan X., Xu O., Scaringi G. Brief communication: post-seismic landslides: the tough lesson of a catastrophe // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2018. – V. 18. – P. 397–403. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-397-2018> (дата обращения 22.07.2022).
44. Зверев А.Т., Малинников В.А., Ареллано-Баеса А. Изучение динамики линейментов, вызванных землетрясениями в Южной Америке, с применением линейментного анализа данных спутника ASTER (TERRA) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 5. – С. 56–65.
45. Hobbs W.N. Liniaments at the Atlantic border region // Geological Society of America Bulletin. – 1904. – V. 15. – P. 483–506.
46. Sonder R.A. Die Liniament tektonik und ihre Probleme // Eclogae Geologicae Helveticae. – 1938. – V. 31. – № 1. – P. 199–238.
47. Zlatopolsky A.A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers & Geosciences. – 1997. – V. 23. – № 1. – P. 45–62.
48. Рогожин Е.А. Блоковое строение земной коры Северной Евразии // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 81–94.
49. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линейментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследования Земли из космоса. – 2007. – № 1. – С. 47–56.
50. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцев Э.Ф. Основы линейментной тектоники. – М.: Недра, 1986. – 144 с.
51. Активные разломы Сахалина / Р.Ф. Булгаков, А.И. Иващенко, Ч.У. Ким, К.Ф. Сергеев, М.И. Стрелцов, А.И. Кожурин, В.М. Бестрашнов, А.Л. Стром, Я. Сузуки, Х. Цуцуми, М. Ватанабе, Т. Уеки, Т. Шимамото, К. Окумура, Х. Гото, Я. Кария // Геотектоника. – 2002. – Т. 36. – № 3. – С. 227–246.
52. Ломтев В.Л., Жердева О.А. К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 3. – С. 56–68.
53. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеанская геология. – 1984. – № 2. – С. 77–86.

Поступила 06.09.2022 г.

Прошла рецензирование: 16.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Купцова О.В.**, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета и РАН.

**Мелкий В.А.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

**Верхотуров А.А.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

**Долгополов Д.В.**, кандидат технических наук, начальник отдела управления проектами Департамента прикладных систем, ЗАО «Ай Ко».

UDC 528.88:528.77: 551.24

## FAULT MAPPING BY DATA OF AEROSPACE SURVEYS TO ENSURE THE SAFETY OF MAIN PIPELINES (FOR EXAMPLE OF THE SECTION CHAYVO-DE-KASTRI PIPELINE)

Olesya V. Kuptsova<sup>1</sup>,  
Korsuncevaolesy@gmail.com

Vyacheslav A. Melkiy<sup>2</sup>,  
vamelkiy@mail.ru

Alexey A. Verkhoturov<sup>2</sup>,  
ussr-91@mail.ru

Daniil V. Dolgoplov<sup>3</sup>,  
d-daniil@yandex.ru

<sup>1</sup> Sakhalin State University,  
290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science,  
1b, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.

<sup>3</sup> CJSC «Ai Co»,  
bld. 1, 8, Bolshoy Drovyanoy lane, Moscow, 109004, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to identify the hazardous geological processes during the construction and operation of pipelines. The Russian Federation ranks second in the world in terms of the total length of main pipelines, where accidents sometimes occur as result of the negative impact of natural and man-made factors. The main hazardous geological processes affecting pipelines are displacements in zones of active faults in the earth's crust. Diagnostics of the presence of fault zones in the territory planned for the construction of linear structures makes it possible to identify potentially dangerous areas that should be paid close attention, and to organize constant monitoring in places of possible movements of soil masses. Based on economic considerations, it is advisable to conduct research using Earth remote sensing data, and modern geoinformation products for data processing. Monitoring using remote sensing allows you to quickly assess the changing engineering and geological conditions in the areas where the pipeline is laid, as well as detect signs of the occurrence of natural processes that pose danger to infrastructure facilities. Monitoring of corridors of main pipeline routes must be carried out by all available means during construction and operation. The use of ArcGIS, QGIS and LEFA software in combination with geophysical data provided by the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences makes it possible to assess seismic activity, its intensity and the nature of the relationship with faults.

**The main aim** of the research is to identify and show on the map the most dangerous areas with active fault zones, that pose a potential threat of negative impact on the pipeline during operation.

**Objects:** space images of the corridor of the main pipeline route to identify ruptures of a seismogenic nature, maps of earthquake epicenters previously identified near the pipeline route.

**Methods:** interpretation of satellite images, methods of geoinformation modeling, mapping, statistical methods, methods of automated lineament analysis, methods for changing the resolution, size and visibility of images without loss of information quality, such as interpolation and aggregation methods, spatial analysis of the interdependence of fault zones and earthquakes, compilation of geoinformation.

**Results.** The analysis of geological, geophysical and satellite information about the territory where the pipeline was laid was carried out in order to identify fault zones. Automated lineament analysis of images in different spectral ranges and with different spatial resolution made it possible to identify the most probable fault zones. The seismic activity of the study area was estimated on the basis of geophysical data. Potentially dangerous sections of the study area, along which the main pipeline is laid, are identified and presented on the map, characterized by the presence of fault zones and increased seismic activity.

### Key words:

Land monitoring, satellite imagery, pipeline system, earthquake, faults, risk, geoinformation mapping, geodetic referencing, QGIS, LEFA

### REFERENCES

1. Akovetsky V.G. *Aerokosmicheskiy monitoring mestorozhdeniy nefii i gaza* [Aerospace monitoring of oil and gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 2008. 454 p.
2. Akovetsky V.G., Afanasiev A.V., Ilchenko A.A. Aerospace monitoring in the problems for assessment of geocological risks for accidental spills of oil and petroleum products. *Computational technologies*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 72–85. In Rus.
3. Bondur V.G., Gavrilov V.P., Tereshchenko P.G. *Aerokosmicheskiy monitoring obektoy neftegazovogo kompleksa* [Aerospace monitoring of oil and gas facilities]. Ed. by V.G. Bandur. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2012. 556 p.
4. Bondur V.G. Aerospace methods and technologies for monitoring of oil and gas areas and facilities. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2010, no. 6, pp. 3–17. In Rus.
5. Bondur V.G., Zverev A.T. A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2015, no. 3, pp. 37–52. In Rus.
6. Dedkova V.V., Komissarov A.V. Analysis of methods and means of control of main pipelines' protective structures. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 77–84. In Rus.
7. *Bezopasnost Rossii. Bezopasnost truboprovodnogo transporta: pravovyye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty* [Russian security. Pipeline transport safety: legal, socio-

- economic, scientific and technical aspects]. Eds. I.I. Mazur, O.M. Ivantsov, S.P. Ansov. Moscow, MGF Znanie Publ., 2002. 750 p.
8. Mazur I.I., Ivantsov O.M. *Bezopasnost' truboprovodnykh sistem* [Safety of pipeline systems]. Moscow, ITs ELIMA Publ., 2004. 1104 p.
  9. Khoroshilov V.S., Komissarov A.V., Kobeleva N.N. Mathematical modeling of deformation processes of the main technological equipment of the chamber receiving and starting the cleaning and diagnostic means (PPS SOD) of the main pipeline. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2021, vol. 26, no. 3, pp. 36–43. In Rus.
  10. Khrenov N.N. *Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov. Aerokosmicheskie metody i obrabotka materialov semok* [Fundamentals of complex diagnostics of northern pipelines. Aerospace methods and processing of survey materials]. Moscow, Gazoil Press, 2003. 352 p.
  11. Balogun L.F., Matori A.N., Lawal D.U. Geovisualization of subsurface pipelines: a 3D approach. *Modern Applied Science*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 158–165.
  12. Galakhar A.S. About application of NURBS to monitoring of operational risk of long distance pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2018, vol. 1141, no. 1, 012083.
  13. Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems. *Acta Scientiarum. Technology*, 2010, vol. 32, no. 2, pp. 171–178.
  14. Roper W.E., Dutta S. Remote sensing and GIS applications for pipeline security assessment. *ESRI User Conference Proceedings. Report*. San Diego. Available at: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap1762.pdf> (accessed 22 July 2022).
  15. Zirnig W., Hausamann D., Schreier G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines. *Earth Observation Magazine*, 2002, no. 11, pp. 12–17.
  16. Bayramov E., Buchroithner M., Kada M. Radar remote sensing to supplement pipeline surveillance programs through measurements of surface deformations and identification of geohazard risks. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 23, 3934.
  17. *Landsat Missions. Website United States Geological Survey (USGS)*. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (accessed 22 July 2022).
  18. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. *GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey)*. Available at: <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 22 July 2022).
  19. Landsat quality assessment ArcGIS toolbox. *United States Geological Survey (USGS) website*. Available at: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox> (accessed 22 July 2022).
  20. Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Identification of disjunctive dislocations as one of the parameters for estimating a territory seismicity of North Sakhalin. *4th GeoProNH. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 946, 012003.
  21. Shiverov S.L. LEFA software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in MATLAB environment. *Advances in Current Natural sciences*, 2018, no. 10, pp. 138–143. In Rus.
  22. Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. Kartografirovaniye razlomov na territorii Severo-Sakhalinskoy ravniny po dannym distantsionnogo zondirovaniya zemli [Mapping of faults on territory of the North Sakhalin plain by remote sensing data]. *InterCarto. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoychivogo razvitiya territoriy. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories. Proc. of the International conference]. Moscow, MSU Publ., 2021. Vol. 27, part 1, pp. 317–329.
  23. Canny J.F. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. 8, pp. 679–698.
  24. Xue L., Pan J. Edge detection combining wavelet transform and canny operator based on fusion rules. *2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, IEEE, 2009, pp. 324–328.
  25. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 1981, vol. 13, no. 2, pp. 111–122.
  26. Kudrina M.A. Using Hough transformation for detecting lines and circles in pictures. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 4 (2), pp. 476–478. In Rus.
  27. Dolgoplov D.V. Theoretical foundations of information support for the operation of main pipelines with aerospace information. *Monitoring. Science and Technology*, 2022, no. 2 (52), pp. 60–64. In Rus.
  28. Karpik A.P., Zharnikov V.B. On the interaction of Earth sciences in the development of the country's oil and gas complex. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2022, vol. 27, no. 2, pp. 173–183. In Rus.
  29. Sizov A.P. Local land monitoring in the region as a tool for managing land resources and preserving the environmental potential of the territory. *Use and protection of natural resources in Russia*, 2021, no. 4 (168), pp. 43–49. In Rus.
  30. Karpik A.P., Musikhin I.A., Vetoshkin D.N. Smart information models as an effective tool of regional spatial and economic development. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 155–163. In Rus.
  31. Melkiy V.A., Tikunova I.N., Eremchenko E.N., Cheresnyha O.Yu., Fukui H., Marta S., Takhdzhana Y. Geoinformation support for decision-making on the use of energy resources of Sakhalin. *InterCarto. InterGIS*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 132–143. In Rus.
  32. *Geosistemy Dalnego Vostoka Rossii rubezhe XX–XXI vekov: v 3-h t.* [Geosystems of the Russian Far East at the turn of XX–XXI centuries: in 3 vol.]. Ed. by P.Ya. Baklanov. Vol. 1. Natural geosystems and their components. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2008. 428 p.
  33. Liao J., Gerya T., Thielmann M., Webb A.A.G., Kufner S.-K., Yin A. 3D geodynamic models for the development of opposing continental subduction zones: the Hindu Kush–Pamir example. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol. 480, pp. 133–146.
  34. Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital Earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. *Big Earth Data*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 476–496.
  35. Dolgoplov D.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Geoinformation support for safe operation of pipeline transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 52–63. In Rus.
  36. Vasilenko N.F., Ivashchenko A.I., Kim Chun Un, Kasahara M., Takahashi H., Kimata F. Deformatsii zemnoy poverkhnosti v epitsentralnoy zone Neftegorskogo zemletryaseniya 27 (28) maya 1995 g. [Deformations of the Earth's surface in the epicentral zone of the Neftegorsk earthquake on May 27 (28), 1995]. *Dinamika ochagovykh zon i prognozirovaniye silnykh zemletryasenyi severozapada Tikhogo okeana* [Dynamics of focal zones and prediction of strong earthquakes of the North West Pacific Ocean]. Ed. by A.I. Ivashchenko. Yuzhno-Sakhalinsk, IMGiG FEB RAS Publ., 2001. vol. 1, pp. 39–57.
  37. Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. Identification of zones of disjunctive dislocations for the territory of Northern Sakhalin according to space image data. *Interexpo Geo-Siberia*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 79–85. In Rus.
  38. Patrikeev V.N., Lomtev V.L. Faults of Northern Sakhalin: structural features and seismic hazard. *Geology and minerals of the World Ocean*, 2016, no. 3, pp. 44–58. In Rus.
  39. Tsutsumi H., Kozhurin A., Streltsov M.I., Ueki T., Suzuki Y., Watanabe M. Active faults and paleoseismology in northeastern Sakhalin II. *Journal of Geography*, 2000, vol. 109, no. 2, pp. 294–301. In Japanese.
  40. Guo Y., Zhuo Y., Liu P., Chen Sh., Ma J. Experimental study of observable deformation process in fault meta-instability state before earthquake generation. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 417–430.
  41. Wang H., Liu M., Duan B., Cao J. Rupture propagation along Stepovers of strike-slip faults: effects of initial stress and fault geometry. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, vol. 110, no. 3, pp. 1011–1024. Available at: <https://doi.org/10.1785/0120190233> (accessed 22 July 2022).
  42. Kieffer D.S., Jibson R., Rathje E.M., Kelson K.I. Landslides triggered by the 2004 Niigata Ken Chuetsu, Japan, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 2006, vol. 22, no. S 1, pp. 47–73.
  43. Fan X., Xu Q., Scaringi G. Brief communication: post-seismic landslides, the tough lesson of a catastrophe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, vol. 18, pp. 397–403. Available at:

- <https://doi.org/10.5194/nhess-18-397-2018> (accessed 22 July 2022).
44. Zverev A.T., Malinnikov V.A., Arellano-Baesa A. Studying dynamics of lineaments caused by earthquakes in South America, using the lineament analysis of ASTER (TERRA) satellite data. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2005, no. 5, pp. 56–65. In Rus.
  45. Hobbs W.N. Lineaments at the Atlantic border region. *Geological Society of America Bulletin*, 1904, vol. 15, pp. 483–506.
  46. Sonder R.A. Die Liniament tektonik und ihre Probleme [Lineament tectonics and its problem]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 1938, vol. 31, no. 1, pp. 199–238.
  47. Zlatopolsky A.A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA. *Computers & Geosciences*, 1997, vol. 23, no. 1, pp. 45–62.
  48. Rogozhin E.A. Block structure of the Earth's crust of Northern Eurasia. *Physics of the Earth*, 2004, no. 10, pp. 81–94. In Rus.
  49. Bondur V.G., Zverev A.T. Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2007, no. 1, pp. 47–56. In Rus.
  50. Kats Ya.G., Poletaev A.I., Romyantseva E.F. *Osnovy lineamentnoy tektoniki* [Fundamentals of lineament tectonics]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 144 p.
  51. Bulgakov R.F., Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Sergeev K.F., Streltsov M.I., Kozhurin A.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., Kariya Y. Active faults in Northeastern Sakhalin. *Geotectonics*, 2002, vol. 36, no. 3, pp. 227–246.
  52. Lomtsev V.L., Zherdeva O.A. To seismotectonic Sakhalin: new approaches. *Geology and useful minerals of the World Ocean*, 2015, no. 3, pp. 56–68. In Rus.
  53. Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A. Fractures of Sakhalin. *Pacific Geology*, 1984, no. 2, pp. 77–86. In Rus.

Received: 6 September 2022.

Reviewed: 16 January 2023.

#### Information about the authors

**Olesya V. Kuptsova**, Cand. Sc., associate professor, Sakhalin State University.

**Vyacheslav A. Melkiy**, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences.

**Alexey A. Verkhoturov**, Cand Sc., senior researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences.

**Daniil V. Dolgoplov**, Cand Sc., head of the Project Management Department, CJSC «Ai Co».

УДК 622.24.08

## СОВРЕМЕННЫЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ

Попова Марина Сергеевна<sup>1</sup>,  
alleniram83@mail.ru

Нескоромных Вячеслав Васильевич<sup>1</sup>,  
sovair@bk.ru

Зотов Захар Геннадьевич<sup>1</sup>,  
zotovz2@bk.ru

Лиу Баочанг<sup>2</sup>,  
liubc@jlu.edu.cn

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

<sup>2</sup> Университет Цзилинь,  
Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

**Актуальность.** Алмазное бурение является одним из перспективных и универсальных способов проходки скважин, при котором возможно достижение высоких скоростей бурения на больших глубинах проведения работ. При этом дорогостоящий алмазный инструмент нуждается в сохранении эффективного ресурса. Разработанный способ управления алмазным бурением на основе комплексного анализа критериев с применением метода полного факторного эксперимента эффективен в случае его реализации в режиме реального времени. Таким образом, актуальной является проблема разработки системы автоматизированного управления режимом алмазного бурения, позволяющего сохранять ресурс инструмента при обеспечении высоких показателей механической скорости бурения и минимальных затратах мощности. Такой подход позволит повысить технико-экономические результаты алмазного бурения.

**Цель:** разработка надежной интерактивной системы наземных датчиков и вычислительного комплекса, позволяющей реализовать автоматизированное управление алмазным бурением на основе комплексного анализа критериев, в полной мере характеризующих сложный процесс бурения, и функционирующей в режиме реального времени.

**Объекты:** процесс алмазного бурения, интерактивные системы, устройства и датчики последнего поколения.

**Методы:** аналитического исследования, компьютерного моделирования, полного факторного эксперимента.

**Результаты.** Представлена система датчиков и вычислительного блока, состоящего из компьютеров и программного обеспечения, способная к детальному сбору и обработке информации, позволяющей дать полную оценку работы инструмента на забое. Описана схема взаимодействия устройств автоматизации процесса алмазного бурения. Приведено подробное описание работы программного обеспечения от сигнала датчиков до вывода результатов на экран табло. Дана характеристика результата применения автоматизированной системы управления процессом алмазного бурения.

### Ключевые слова:

бурение, управление, оптимизация, алгоритм, режим бурения, автоматизация, программное обеспечение.

### Введение

Проведение буровых работ в современных горно-геологических и экономических условиях требует кардинально новых подходов к контролю и управлению технологией процесса бурения [1–23].

Алмазное бурение как перспективный и универсальный способ проходки скважин отличается применением дорогостоящего инструмента, эффективный ресурс которого напрямую влияет на результаты технико-экономических показателей буровых работ [10]. При этом применение алмазного вида инструмента позволяет достигать высоких скоростей проходки. Отсюда следует, что для достижения наилучших результатов применения такого способа бурения необходимо обеспечение баланса между износом инструмента и реализацией высоких темпов процесса бурения.

Разработанный метод управления алмазным бурением на основе комплексного анализа критериев про-

ходки скважин позволяет, опираясь на анализ горно-геологических условий и ресурса инструмента, подбирать оптимальный режим его работы, способствующий щадящему износу инструмента при максимально допустимой механической скорости бурения и минимальных затратах мощности [1, 10, 12].

Реализация описанного управления возможна путем применения метода полного факторного эксперимента, позволяющего, при наличии данных о характере взаимодействия режущей поверхности бурового инструмента с забоем скважины, строить математические модели, отражающие влияние параметров режима бурения (частоты вращения, осевой нагрузки и подачи промывочной жидкости) на показатели механической скорости бурения, углубления за оборот и энергоемкости бурового процесса [1, 10, 12]. Интегративный анализ получаемых таким образом зависимостей позволяет определять производительность бурового инструмента, энергопотребление, эффек-

тивность разрушения горной породы, делать вывод о состоянии инструмента (изношен/не изношен) и эффективности его эксплуатации, не прерывая процесс бурения. Новизной представленного метода управления является возможность анализа работы бурового инструмента на основе системы трех критериев процесса бурения, что способствует соблюдению точности получаемых результатов, направленных на повышение ресурса инструмента и качества проводимых работ.

#### Основы метода управления

Итак, оптимальным считается режим эксплуатации бурового инструмента, при котором в случае допустимой реализации его ресурса достигаются максимальные скорости бурения и минимальные затраты мощности. На первых этапах исследования определено, что при прочих равных технико-технологических условиях на разных стадиях процесса бурения по мере износа инструмента и смены геологического разреза наблюдаются изменения характера разрушения горной породы на забое, что требует своевременного регулирования параметров режима бурения для осуществления эффективной работы инструмента. Причем чем быстрее будет реакция (отклик) на буровую ситуацию, тем надежнее достижение наилучших результатов. Частота таких изменений различна и зависит от типа, конструкции бурового инструмента, оборудования, области их применения и других производственных факторов. Поэтому для управления алмазным бурением с целью достижения оптимального режима работы бурового инструмента необходим автоматизированный подход с применением современных информационных компьютерных технологий. А рациональным управление алмазным бурением будет в том случае, когда предложенный метод управления будет реализован в режиме реального времени (онлайн).

Предполагается, что такая интерактивная система состоит из вычислительной машины – компьютера управления и связанных с ним датчиков, и заключается в следующем. Компьютер непрерывно получает сигнал о состоянии системы взаимодействия бурового инструмента с забоем, преобразовывает и обрабатывает полученную информацию, далее выдает результат в виде отклика, отражающего необходимые для данного момента бурения значения показателей режима бурения, реализация которых гарантирует максимально возможную механическую скорость бурения и минимальные затраты мощности при умеренном сохранении ресурса инструмента.

Для разработки программного обеспечения такой вычислительной машины в качестве базиса принят алгоритм, в основу которого заложен расчет и анализ параметров механической скорости бурения и мощности в зависимости от изменения частоты вращения, осевой нагрузки и углубления за оборот. Разработанный алгоритм позволяет в зависимости от сложившейся ситуации осуществлять регулирование показателей режима бурения до достижения оптимального состояния работы инструмента и поддерживать его в

допустимых пределах [1, 2]. Исходными данными при этом выступают показатели частоты вращения, осевой нагрузки, подачи промывочной жидкости, углубления за оборот, которые непрерывно и быстро должны обрабатываться компьютером.

Таким образом, для технической реализации предложенного управления необходима разработка системы датчиков и схемы их взаимодействия в условиях возможностей бурового оборудования, а также программного обеспечения, позволяющего преобразовывать электронный сигнал от датчиков в параметры управления и интерактивно реализовывать предложенный алгоритм обработки данных.

#### Схема оборудования автоматизированной системы управления

Существующие телеметрические системы облегчают подобный сбор и обработку данных. Однако серийно выпускаемые забойные датчики прямого измерения зачастую весьма габаритны. Они без проблем могут быть применены лишь в случае бурения скважин большого диаметра, например, эксплуатационного назначения. При бурении скважин малого диаметра, особенно на больших глубинах, геометрические параметры скважины и оборудования, находящегося в ней в процессе бурения, не позволяют располагать какие-либо приборы или дополнительные устройства в призабойной зоне. Описанная ситуация характерна, например, для геологоразведочного бурения, в процессе которого применение алмазного инструмента характеризуется минимальными зазорами, загромождение которых недопустимо спецификой протекающих в скважине процессов и чревато нарушением технологии бурения.

При этом для исполнения предложенного метода управления передача информации (от источника к пульту управления) в такой системе должна иметь соответствующее направление и представлять собой схему, показанную на рис. 1.

Основываясь на выделенных особенностях описанной проблемы, для реализации предложенного метода управления разработана схема расположения наземного оборудования (на примере современной гидравлической буровой установки DBC S21, способной бурить на глубине 2200 м с частотой вращения более 1500 мин<sup>-1</sup>) и сеть взаимодействия датчиков с компьютером управления (рис. 2, 3).

Согласно предложенной схеме (рис. 2) ротор установки оборудуется датчиками: оборотов ротора (например, бесконтактным ДОР-1) и момента на роторе (ДМ, КЭИ-ПЭ1 500 4/20), что позволяет, помимо частоты вращения ( $\omega$ ), получать данные о затрачиваемой на вращение колонны мощности ( $N_{вр}$ ), которая рассчитывается компьютером как произведение величины момента на показатель частоты вращения.

Гидравлический механизм подачи оснащается манометром (например, *UniTrans*), что позволяет производить расчет осевого усилия исходя из величины фиксируемого манометром давления и геометрических параметров гидроцилиндров подачи.

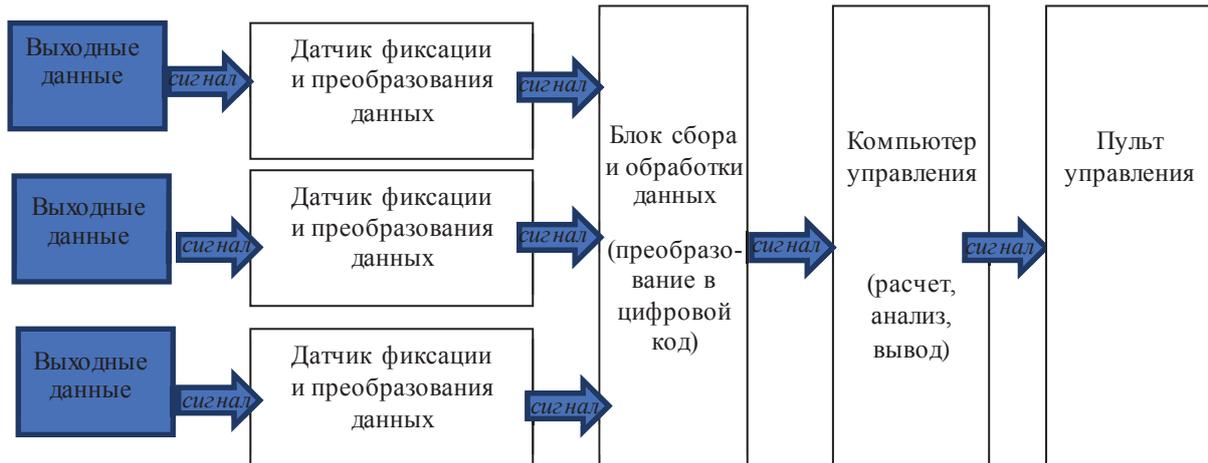


Рис. 1. Схема передачи информации в интерактивной системе управления процессом алмазного бурения  
 Fig. 1. Scheme of information transfer in the interactive control system of the diamond drilling

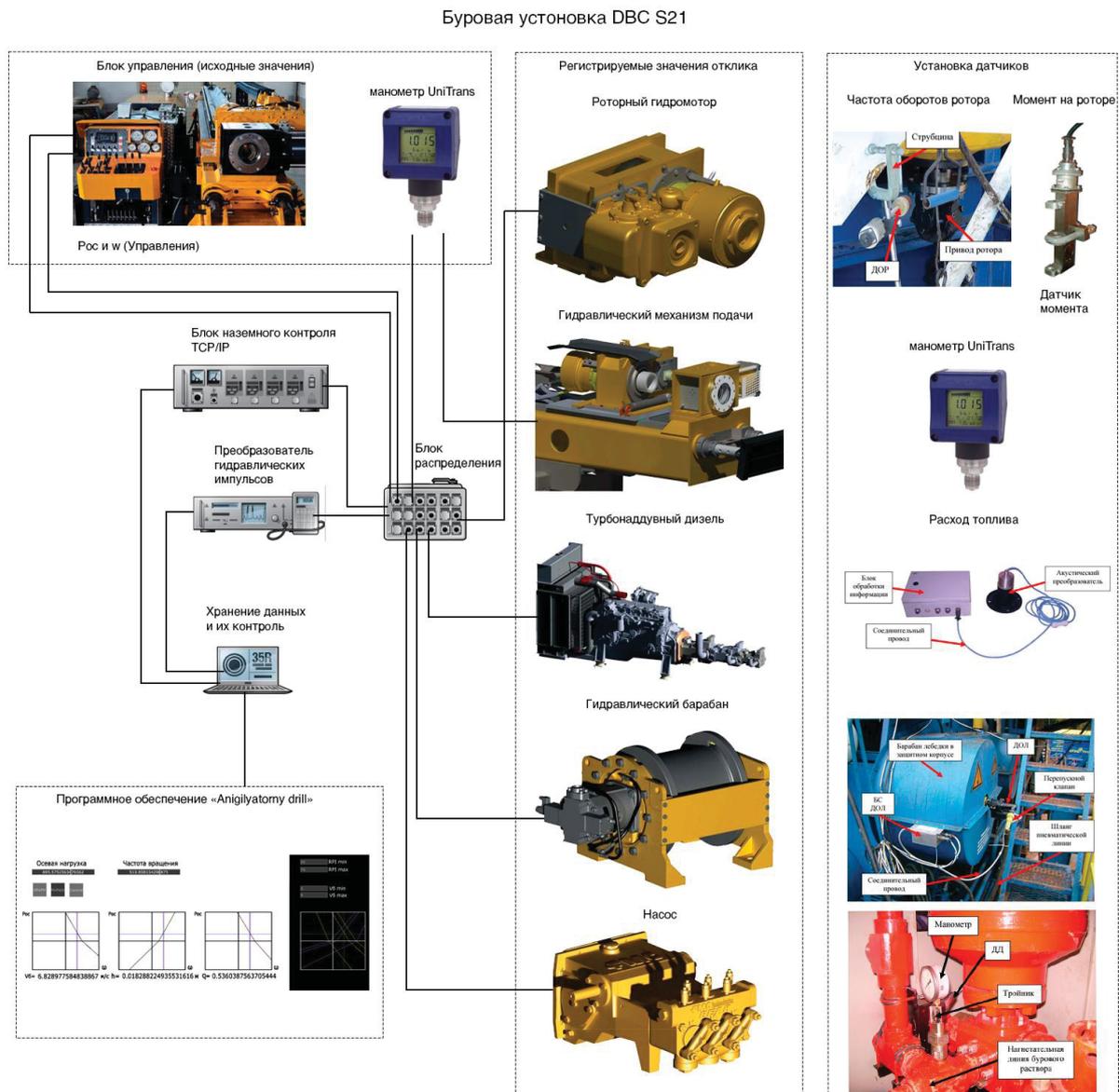


Рис. 2. Схема оборудования системы управления на примере бурового станка DBC S21  
 Fig. 2. Scheme of equipment of the control system on the example of a drilling rig DBC S21

В случае подачи с лебедки в систему может вводиться датчик веса (типа ДНК-311-06), позволяющий путем преобразования усилия натяжения неподвижной ветви талевого каната в электрический сигнал или цифровой код вычислять параметры веса на крюке и осевой нагрузки на инструмент.

Учитывая особенности работы дизельного двигателя, его оснащение датчиком расхода жидкости (ультразвуковым расходомером, работа которого основана на действии акустического преобразователя) позволяет, исходя из фиксируемого значения расхода топлива ( $Q$ ) в процессе бурения скважины, с учетом паспортных значений удельного расхода топлива агрегата ( $q$ ), рассчитывать мощность на двигателе ( $N_d$ ) как:

$$N_d = \frac{Q}{q}$$

С целью определения в любой момент бурения глубины скважины (и как следствие величины углубления за оборот  $h_{об}$ ) буровая лебедка оборудуется датчиком оборота лебедки (ДОЛ). На сегодняшний день отечественные ДОЛ имеют техническое оснащение, рассчитанное на скорость до  $1500 \text{ мин}^{-1}$  (ТПГ) и до  $2000 \text{ мин}^{-1}$  (ЗАО

НППГА «Луч», ООО «Геотек-Прибор»). Используя показатели ДОЛ, углубление забоя скважины за исследуемый период времени определяют исходя из диаметра барабана лебедки и диаметра используемого каната.

Оснащение насоса расходомером и датчиком давления позволяет фиксировать и контролировать в процессе бурения показатель подачи промывочной жидкости.

Представленная система датчиков синхронизируется блоком распределения, от которого информация подается на блок наземного контроля, и через преобразователь импульсов сигнал в виде цифрового кода поступает на компьютер управления.

В данном случае система управления буровой установкой включает пульты, объединяющие в себе органы управления, цепи управления и исполнительные механизмы. Для реализации представленной интерактивной системы управления компьютеры, сетевой концентратор, источник бесперебойного питания и другая аппаратура монтируются в центральный шкаф. При этом вся аппаратура подключается друг к другу согласно схеме, представленной на рис. 3.

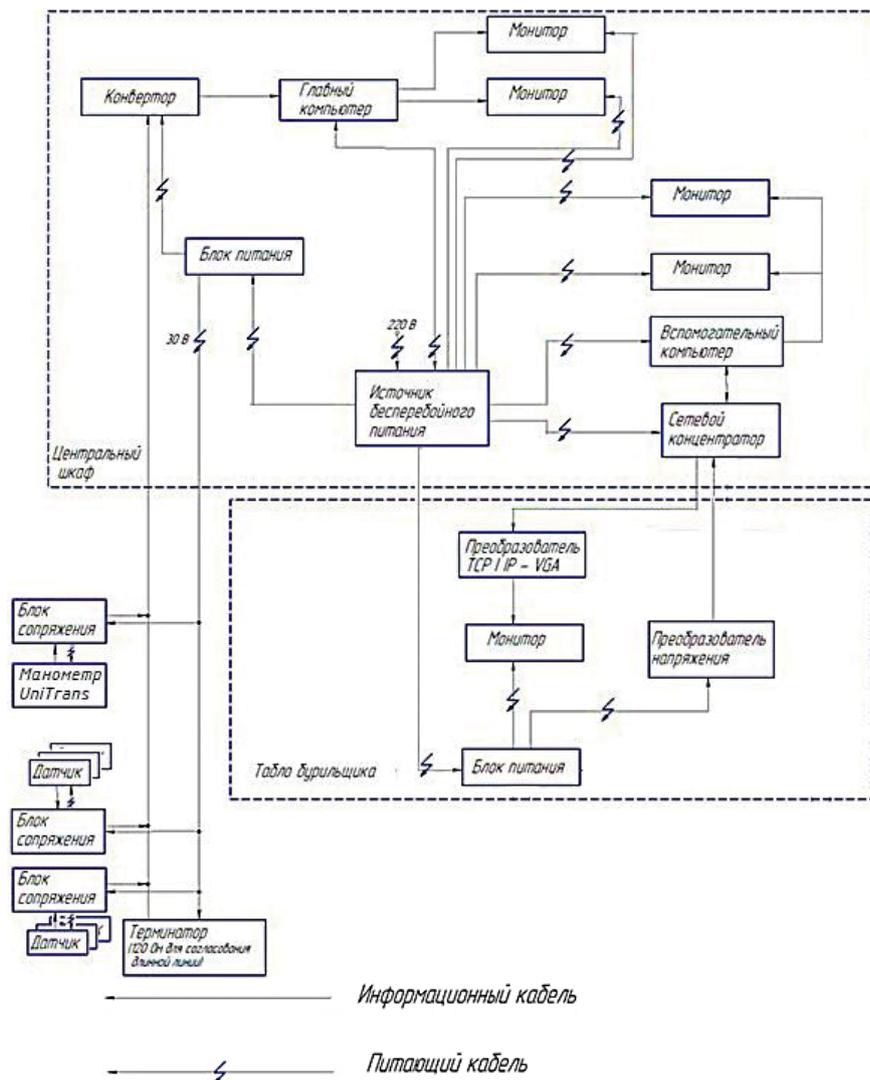


Рис. 3. Схема подключения электрооборудования  
 Fig. 3. Electrical connection diagram

Преимуществом применения представленной схемы электрооборудования выступает возможность полной реализации мощности каждого агрегата для питания всех потребителей электроэнергии. К тому же схема предусматривает функцию параллельной работы нескольких дизель-генераторов, что в случае необходимости остановки одного из агрегатов обеспечивает бесперебойное резервирование электрооборудования, а также при подключении дополнительных устройств распределение нагрузки на каждый дизель-генератор.

В схеме входные гидравлические значения манометров с переводом в электрический сигнал собираются в конвертере с внешними откликами датчиков частоты вращения ротора, расхода жидкости, скорости бурения, натяжения троса, глубины, энергоёмкости. В главном компьютере программа соотносит и оптимизирует входные значения со значениями откликов внешних показателей бурения для оптимальной корректировки в режиме реального времени. В итоге на выходе критические, текущие и рекомендуемые значения параметров бурения отображаются на табло бурильщика.

#### Программное обеспечение

Имея представленную систему оборудования, надежно и быстро поставляющую информацию на компьютер управления, важным остается его программное обеспечение, способное верно распознавать получаемую информацию, обрабатывать ее, производить необходимые расчеты, строить математические модели зависимостей параметров бурения и графически интерпретировать их с целью поиска оптимальных значений.

Для реализации представленной системы интерактивного управления алмазным бурением разработан программный продукт «Anigilyatorn' drill». Программа написана на языке программирования *TouchDesigner*, преимуществом которого является совместимость с датчиками различной комплектации и возможность визуализации результатов обработки данных в виде систем математических моделей любой сложности и графиков зависимостей.

Исходя из типа и конструкции алмазного инструмента, согласно рекомендуемым производителем значениям показателя *RPI*, в окне ввода данных пользователем задаются критерии управления – требуемое значение показателя углубления за оборот (как величина обратная показателю *RPI*) и желаемый максимум механической скорости бурения (рис. 4, а).

Получая сигнал в виде цифрового кода, программа осуществляет сортировку и расчет текущих показателей датчиков: частоты вращения, момента на вращателе, давления в гидросистеме механизма подачи, расхода промывочной жидкости, количества оборотов лебедки, расхода топлива на двигателе и т. д. На основании полученных данных программа осуществляет комплекс расчетов, необходимых для определения параметров, в полной мере характеризующих процесс бурения, например, мощности на двигателе, мощности на вращателе, осевого усилия на инструмент, подачи промывочной жидкости, текущего значения углубления за оборот и т. д. Далее, согласно методу полного факторного эксперимента, формирует математические модели зависимостей параметров бурения и в виде графиков выводит на экран линии по каждому заданному значению (рис. 5).

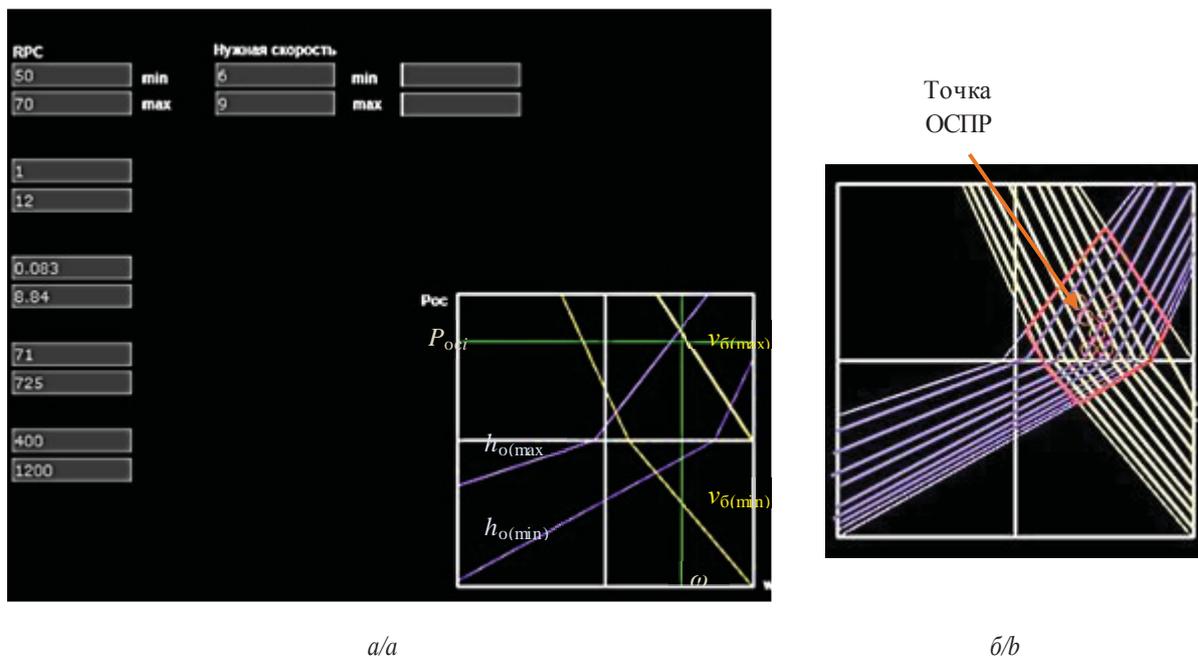


Рис. 4. Интерфейс программы Anigilyatorn' drill: а) общий вид; б) поиск оптимального сочетания параметров режима бурения

Fig. 4. Program interface Anigilyatorn' drill: а) general form; б) search for the optimal combination of drilling mode parameters

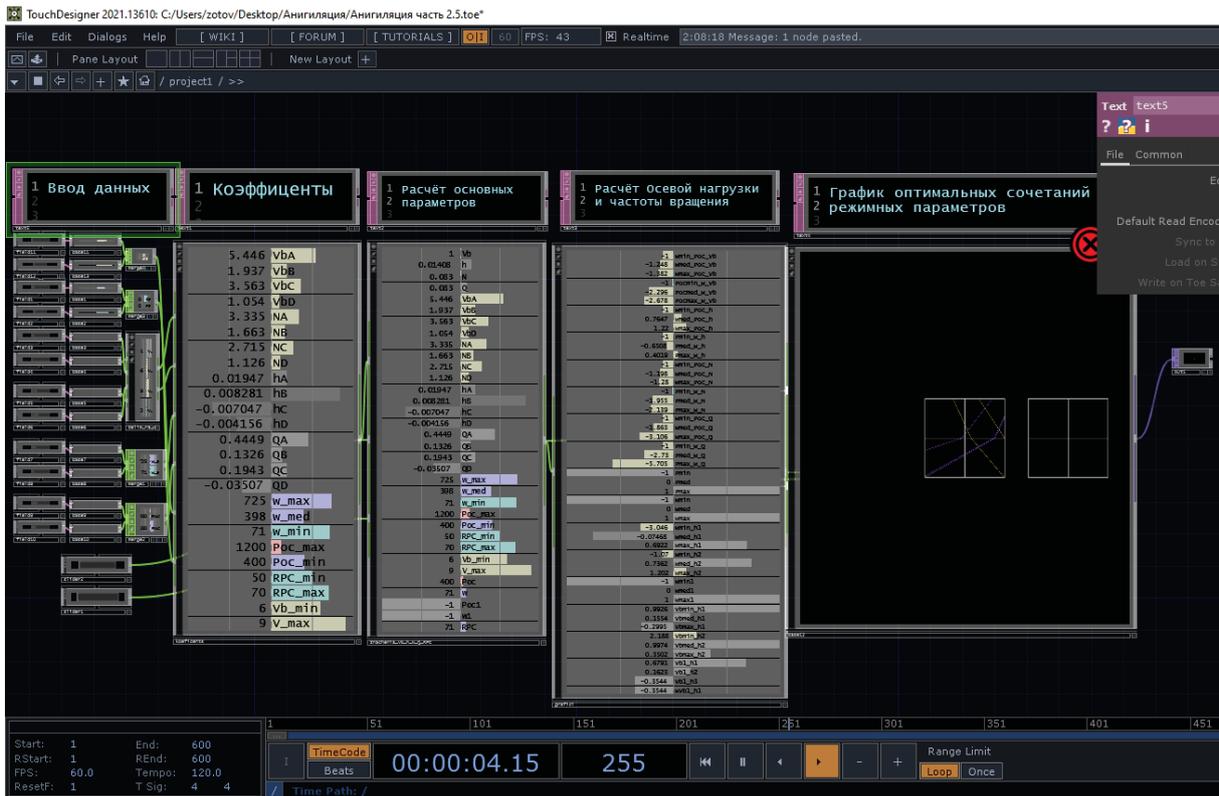


Рис. 5. Внутренняя структура работы программы Anigilyatorn' drill  
 Fig. 5. Internal structure of the program Anigilyatorn' drill

Полученные линии являются результатом графической интерпретации математических моделей, отражающих зависимость механической скорости бурения ( $v_0$ ) и углубления за оборот ( $h_0$ ) от частоты вращения ( $\omega$ ) и осевой нагрузки ( $P_{oc}$ ), полученных как:

$$v_0 = A + B \cdot P_{oc} + C \cdot \omega + D \cdot P_{oc} \cdot \omega;$$

$$h_0 = E + F \cdot P_{oc} + D \cdot \omega + H \cdot P_{oc} \cdot \omega;$$

где  $A, B, C, D, E, F, H, K, L, M, S$  – коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с методикой полного факторного эксперимента [1, 2, 10].

Пересечение графиков, отражающих реализацию максимально возможной скорости бурения ( $v_{0(max)}$ ), минимально возможной скорости бурения ( $v_{0(min)}$ ), максимально допустимого (по RPI) углубления за оборот ( $h_{0(max)}$ ) и минимально допустимого углубления за оборот ( $h_{0(min)}$ ), формирует многоугольник, который представляет собой область оптимального режима работы бурового инструмента (рис. 4). В любой точке выделенной области можно определить сочетание величин частоты вращения ( $\omega_i$ ) и осевой нагрузки ( $P_{oci}$ ), при реализации которых осуществляется рациональное использование породоразрушающего инструмента. Для автоматизации процесса анализа полученной области оптимальных значений и перебора данных в программу заложен скрипт, позволяющий находить все точки пересечения значений параметров бурения, входящих в эту область, – точки оптимального сочетания параметров режима бурения (ОСПР) (рис. 4, б).

На протяжении всего процесса бурения программа рассчитывает текущий (в данный момент времени) показатель механической скорости  $v_i$  как произведение текущего значения углубления за оборот  $h_{0i}$  (из обработки данных ДОЛ) и частоты вращения (по сигналу от ДОР). Полученная величина механической скорости бурения  $v_i$  сравнивается со значением в предыдущий момент времени  $v_{i-1}$ . Если  $v_i < v_{i-1}$ , система сигнализирует о том, что скорость бурения падает. Если  $v_i > v_{i-1}$ , система делает вывод о росте скорости. Аналогично, имея, благодаря разработанной интерактивной системе датчиков, значение мощности, затрачиваемой на вращение колонны  $N_{вр}$ , и мощности на двигателе  $N_d$ , программой осуществляется расчет мощности, затрачиваемой на разрушение горной породы в текущий момент бурения  $N_i$  и реализуется анализ всех трех показателей. Если значение мощности в данный момент времени больше, чем в предыдущий, делается вывод о том, что затраты мощности повышаются, и наоборот [2].

Основываясь на исследовании механизма разрушения породы алмазным резцом [4, 5, 7, 15–17, 19], программа осуществляет регулирование показателей режима бурения так, чтобы значения частоты вращения и осевой нагрузки, оставаясь в пределах области оптимальных значений, позволяли достигать максимально возможной величины механической скорости бурения без критического повышения мощности [2]. На мониторе точка оптимального сочетания параметров режима бурения должна находиться как можно ближе к вершине полученного многоугольника  $v_{0(max)}$ .

представленного на рис. 4, б. Например, когда механическая скорость падает, а мощность растет, точка ОСПР будет находиться в нижней части графического многоугольника. При этом на табло появляется сигнал о необходимости снижения частоты вращения и повышения осевой нагрузки. Такой маневр позволит снизить сопротивление инструменту и увеличить глубину внедрения его резцов в породу, что обеспечит эффективное разрушение горной породы без аномального износа режущей части инструмента [9, 18]. Верная корректировка режимов бурения отразится на графике в виде точки ОСПР, смещенной ближе к вершине многоугольника.

Случай, когда точка ОСПР выйдет за пределы многоугольника, указывает на износ инструмента и необходимость снижения критерия управления – углубления за оборот. При вводе уменьшенного на ступень (в допустимых показателем  $RPI$  пределах [1, 2, 10, 12]) показателя критерия управления программа перестраивает многоугольник области оптимального режима работы бурового инструмента и цикл управления повторяется.

Представленный метод сбора, обработки, анализа информации и управления буровым процессом является надежным способом повышения технико-экономических показателей бурения. При этом уровень точности и скорости реагирования на забойные процессы определяет качество проводимых работ. Представленный интерактивный анализ взаимодействия бурового инструмента с забоем осуществляется в конкретных временных рамках с заранее заданным шагом обработки данных. То есть результат достигается в определенных точках отмеченной области, при этом промежуточный результат остается необрабо-

ванным. Для ускорения дальнейшего процесса обработки данных и охвата всей области оптимальных параметров бурения в программе заложена функция сбора и хранения значений и результатов возможных откликов системы. Наличие такой базы данных способствует быстрому реагированию системы. Непрерывно собирая и храня информацию, полученную в процессе управления, программа повышает результативность ее применения, т. е. является самообучаемой.

С этой целью в алгоритм программного обеспечения компьютера управления заложен разработанный скрипт, позволяющий находить значения всех точек пересечения графиков  $v_0$  и  $h_0$ , входящих в область оптимальных значений параметров бурения для данных условий проводимых работ (рис. 4). Количество линий ( $k$ ) определяется как

$$k = v_{0\max} - v_{0\min} / n.$$

Программа производит перебор параметров с шагом  $v_{0\min} + k$  до тех пор, пока критерий  $v_{0\max}$  не достигнет значения  $v_{0\min} + k = v_{0\max}$ . Таким образом для каждой точки  $v_{0\min} + k$  находятся все соотношения осевой нагрузки  $P_{oc}$  и частоты вращения  $\omega$ . Далее происходит отсортировка по значению частоты вращения  $\omega$  в линиях графиков значений  $h_{0(\min)}$  и  $h_{0(\max)}$  с целью выделения граничных условий.

Параметр осевого усилия  $P_{oc}$  кодируется от  $-1,0$  до  $1,0$  с шагом  $0,1$ . При  $P_{oc} = -1$ :  $\omega_{h(\max)} < \omega < \omega_{h(\min)}$ . Алгоритм продолжается до тех пор, пока не будут отсортированы все  $P_{oc}$  и  $\omega$  по значению  $v_{0\min} + k = v_{0\max}$ .

Запуск написанного скрипта *text10* (рис. 6) на выводе формирует таблицу данных всех комбинаций  $P_{oc}$  и  $\omega$ , входящих в оптимальную область значений с откликом на значение углубления за оборот.



Рис. 6. База данных значений, входящих в оптимальную область значений  
 Fig. 6. Database of values included in the optimal range of values

По мере наполнения такой базы данных реакция системы на условия бурения ускоряется за счет синхронизации отклика и фактора, снятого с датчиков. При изменении буровой ситуации программа автоматически находит кратчайший путь для возвращения режима бурения в область оптимальных значений.

## Выводы

1. Достижение наилучших технико-экономических результатов алмазного бурения возможно за счет автоматизации управления, основанного на интерактивной системе взаимодействующих устройств, работа которых описывается алгоритмом управ-

- ления на основе комплексного анализа трех критериев процесса бурения.
2. Система сбора и обработки информации, предназначенная для контроля технологических параметров алмазного бурения, может представлять собой комплекс наземного оборудования, который может включать:
    - блок управления;
    - блоки концентратора связи;
    - пульт управления;
    - технологические датчики;
    - соединительных кабелей;
    - вычислительный комплекс.
  3. Разработанная интерактивная система датчиков, интегрированных в вычислительный комплекс, включающий компьютеры и соответствующее программное обеспечение, позволяет учитывать основные особенности условий проведения буровых работ, сбор, обработку и систематизацию данных на основе метода полного факторного эксперимента и, таким образом, является основой качественного управления процессом алмазного бурения, основными параметрами которого являются высокие механическая скорость бурения и эффективный ресурс бурового инструмента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев // Записки Горного Института – 2019. – Т. 240. – С. 701–710.
2. Алгоритм управления системой алмазного бурения / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, З.Г. Зотов, Б. Лю // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 81–89. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3562.
3. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осечкин, Н.В. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39 (1). – P. 41–58.
5. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – V. 35 (3). – P. 141–160.
6. Коротков А.В. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения // Известия сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2011. – Т. 2 (39). – С. 205–209.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45 (8). – P. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 30 (2). – P. 145–164.
9. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами ПДС: монография. – Томск: ТПУ, 2013. – 166 с.
10. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 246 с.
11. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
12. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48 (3). – P. 434–442.
13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 96–97. – P. 109–119.
14. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // Measurement. – 2018. – V. 121. – P. 344–354.
15. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – V. 45. – P. 147–152.
16. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
17. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. I. – С. 463–465.
18. Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.
19. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 113. – P. 11–23.
20. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10 (6). – P. 476–479.
21. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2020. – V. 190. – № 107120.
22. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H. Aslaksen, M. Annand, R. Duncan, A. Fjaere, L. Paez, U. Tran // Society of Petroleum Engineers. SPE Drilling Conference. – Miami, Florida, USA, 2006. – P. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
23. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – V. 37 (13). – P. 1913–1929.

Поступила: 14.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 10.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Попова М.С.**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Нескоромных В.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Зотов З.Г.**, студент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Лю Баочанг**, профессор геотехнологий кафедры разведки и бурения, Университет Цзилин.

UDC 622.24.08

## MODERN BASIS OF AUTOMATION OF DIAMOND DRILLING CONTROL

Marina S. Popova<sup>1</sup>,  
alleniram83@mail.ru

Vyacheslav V. Neskoromykh<sup>1</sup>,  
sovair@bk.ru

Zakhar G. Zotov<sup>1</sup>,  
zotovz2@bk.ru

Liu Baochang<sup>2</sup>,  
liubc@jlu.edu.cn

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

<sup>2</sup> Jilin University,  
938, Ximinzhū street, Changchun, 130026, China.

**The relevance.** Diamond drilling is one of the promising and versatile methods of well drilling, which makes it possible to achieve high drilling speeds at great depths of work. At the same time, an expensive diamond tool needs to save a resource. The developed method for managing diamond drilling based on a comprehensive analysis of criteria using the method of a full factorial experiment is effective if it is implemented in real time. Thus, the problem of developing an automated control system for the diamond drilling mode, which makes it possible to save the resource of the tool while ensuring high rates of mechanical drilling speed and minimal power consumption, is topical. This approach will improve the technical and economic results of diamond drilling.

**The aim of the work is to develop a reliable interactive system of ground sensors and a computer complex that allows implementing automated control of diamond drilling based on a comprehensive analysis of criteria that fully characterize complex drilling and operate in real time.**

**Objects:** diamond drilling, interactive systems, devices and sensors of the latest generation.

**Methods:** analytical research, computer simulation, full factorial experiment.

**Results.** The paper introduces the system of sensors and computing unit, consisting of computers and software, capable of collecting and processing information in detail, which makes it possible to give a full assessment of the work of the tool at the bottomhole. The authors describe the scheme of interaction of devices for automation of diamond drilling. The paper introduces the detailed description of the software operation from the sensor signal to the display of the results on the display screen and the characteristic of the result of the application of an automated control system for diamond drilling.

**Key words:**

drilling, control, optimization, algorithm, drilling mode, automation, software.

## REFERENCES

- Neskoromykh V.V., Popova M.S. Development of a drilling process control technique based on a comprehensive analysis of the criteria. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 701–710. In Rus. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701.
- Neskoromykh V.V., Popova M.S., Zotov Z.G., Liu Baochang. Algorithm of diamond drilling system control. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 81–89. In Rus.
- Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskiy A.I., Soloviev N.V. Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodorzushayushchego instrumenta [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Razvedka i ohrana nedr*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
- Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
- Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
- Korotkov A.V. Sovremennyy vzglyad na osnovnyye zadachi optimizatsii almaznogo bureniya [A modern look at the main tasks of optimization of diamond drilling]. *Izvestiya sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenij*, 2011, no. 2 (39), pp. 205–209.
- Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
- Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
- Borisov K.I. *Sovremennyye metody otsenki soprotivleniya gornykh porod rezaniyu–skalyvaniyu pri burenii dolotami PDC. Monografiya* [Modern methods for assessing the resistance of rocks to cutting–chipping when drilling with PDC bits. Monograph]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 166 p.
- Neskoromykh V.V. *Optimizatsiya v geologorazvedochnom proizvodstve* [Optimization in geological survey production]. Moscow, INFRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2013. 246 p.
- Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
- Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
- Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
- Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.
- Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 147–152.

16. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.
17. Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii* [Materials of regional conference of geologists from Siberia, far east and North-East of Russia]. Tomsk, 2000. Vol. I, pp. 463–465.
18. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Influence of resistance forces on the depth of rock cutting–chipping by a diamond cutter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 40–48. In Rus.
19. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
20. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
21. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
22. Aslaksen H., Annand M., Duncan R., Fjaere A., Paez L., Tran U. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization. *Society of Petroleum Engineers/SPE Drilling Conference*. Miami, Florida, USA, 2006. pp. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
23. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.

Received: 14 February 2023.

Reviewed: 10 March 2023.

#### Information about the authors

**Marina S. Popova**, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

**Vyacheslav V. Neskromnykh**, Dr. Sc., professor, head of the Department of Technology and Equipment of Investigation, Siberian Federal University.

**Zakhar G. Zotov**, student, Siberian Federal University.

**Liu Baochang**, professor, Jilin University.

УДК 630\*431:504.4(571.621)

## ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА Г. БИРОБИДЖАНА

**Зубарева Анна Михайловна**<sup>1</sup>,  
anna-doroshenko@yandex.ru

**Глаголев Владимир Александрович**<sup>1</sup>,  
glagolev-jar@yandex.ru

**Жучков Дмитрий Витальевич**<sup>1</sup>,  
dmitriy.zhuchkov.2000@mail.ru

<sup>1</sup> Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,  
Россия, 679016, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, 4.

**Актуальность.** На территории г. Биробиджана и в десятикилометровой зоне от его границы проживает около 50 % населения Еврейской автономной области. В связи с этим актуально проанализировать особенности пространственно-временного распространения пожаров растительности в окрестностях города и интенсивность дымового воздействия на атмосферу г. Биробиджана.

**Цель:** анализ влияния пожаров растительности на состояние атмосферного воздуха г. Биробиджана.

**Объекты:** пожары растительности в десятикилометровой зоне от границы г. Биробиджана.

**Методы.** В основу работы положены данные о количестве пожаров в окрестностях г. Биробиджана за 2010–2015 и 2017–2020 гг. по данным Департамента управления лесами правительства Еврейской Автономной Области. Для отображения распространения пожаров была выполнена карта горимости растительности на исследуемой территории в геоинформационной системе MapInfo Professional 9.0. Анализ дымового переноса проведен с помощью направлений ветра, отраженных в графиках розы ветров. Основой для построения картосхем, отражающих дымовое воздействие, послужила модернизированная формула для моделирования выбросов Саттона и методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных примесей ОНД-86. Авторский алгоритм выполнен в среде программирования MapBasic, который входит в пакет геоинформационной системы MapInfo Professional 9.0. Получена шкала интенсивности дымового воздействия на атмосферу для исследуемой территории.

**Результаты.** На основании пространственно-временного анализа определены наиболее и наименее пожароопасные месяцы в период 2010–2015 и 2017–2020 гг. Отмечены территории, постоянно подвергаемые действию пожаров растительности. В соответствии с графиками розы ветров выполнены картосхемы, отражающие интенсивность дымового воздействия на атмосферу г. Биробиджана.

### **Ключевые слова:**

Пожары растительности, пожароопасность, горимость территории, дымовой перенос, дымовое воздействие, г. Биробиджан, направление ветра.

### **Введение**

Растительные сообщества являются важнейшим компонентом биосферы, который поддерживает ее стабильность и устойчивость. Вмешательство человека в природные экосистемы приводит к их преобразованию и разрушению. Одним из примеров можно считать возникновение пожаров растительности, которые изменяют характер и динамику фитоценозов. Термин «пожары растительности», под которым понимается распространение горения по территории, обусловленное морфологической структурой растительного покрова, является устоявшимся в литературе [1–9]. В результате горения растительных материалов образуется множество загрязняющих веществ, создающих дополнительную экологическую нагрузку на атмосферный воздух [2, 10–13]. Частицы дымов способны образовывать группы вредных веществ, вызывая ухудшение здоровья у людей [5, 6, 12, 14, 15]. По прогнозам ООН, ежегодно около 300000 человеческих смертей происходит от дымов пожаров растительности [16]. В связи с этим проблема изучения распространения продуктов горения в результате пожаров растительности весьма актуальна.

Еврейская автономная область (ЕАО) относится к южной и наиболее горимой части Дальнего Востока. На её территории проводился анализ пожаров растительности и причин их возникновения без экологической оценки [7, 17, 18]. В связи с этим целью данной работы является анализ влияния пожаров растительности на состояние атмосферного воздуха г. Биробиджана.

Для достижения поставленной цели необходимо оценить пирологическое воздействие на атмосферный воздух г. Биробиджана как регионального центра и места сосредоточения большей части населения в ЕАО, поэтому территорией для анализа выбрана десятикилометровая зона от его границы. Выбор района работ основан на данных исследований отечественных и зарубежных специалистов, установивших, что десятикилометровая зона от границы городов на 70 % [19] подвержена воздействию пожаров растительности [2, 14, 15, 17], а их количество зависит от освоенности территории [2, 7]. Исследуемая зона относится к Биробиджанскому лесхозу Городского участкового лесничества, для которых характерны высокие показатели плотности дорожной сети (0,195 км/км<sup>2</sup>), населения (20 чел/км<sup>2</sup>), населенных пунктов (38) [7, 17].

Объектом исследования выбраны пожары растительности, возникшие в окрестностях города за период 2010–2015 и 2017–2020 гг.

Для средних городов юга Дальнего Востока подобные исследования не проводились. В связи с этим требуется дальнейшая проработка вопроса, в котором будет отражено влияние пожаров растительности на состояние атмосферного воздуха городов. Полученные результаты позволят проводить систематическую экологическую оценку.

#### Материалы и методы

В работе использовали статистику пожаров растительности на исследуемой территории по данным учета Департамента управления лесами правительства ЕАО за 2010–2015 и 2017–2020 гг. (данные о пожарах за 2016 г. отсутствуют, так как возникли сложности с их первичной обработкой и вводом в геоинформационную систему «Пожары»). Инвентаризационные карты выполнены в геоинформационной системе MapInfo Professional 9.0. сотрудниками лаборатории региональных геоэкологических исследований Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, в структуру которой входят авторские цифровые базы данных горельников. В работе использовалась классификация пожаров растительности по площади их действия, га: загорание – 0,1–0,2, малый пожар – 0,2–5, небольшой – 5,1–20, средний – 20,1–200, большой – 201–1000, крупный – 1000–10000, катастрофический более 10000 [20].

Направления воздушных потоков определялись по графикам розы ветров, построение которых выполнялось в программе Microsoft Excel 2016 [21].

Визуализация электронных картосхем интенсивности дымового воздействия основана на модернизированной формуле для моделирования выбросов вредных примесей Сагтона и методики расчета концентрации вредных примесей в атмосферном воздухе ОНД-86, модифицированных применительно к неорганизованным площадным источникам загрязнения [22, 23].

$$l = R * \frac{P}{P_0},$$
$$R = \frac{5 - F}{4} dH,$$

где  $l$  (м) – расчетный размер полигона;  $R$  (м) – расчетный размер участка местности в данном направлении;  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;  $H$  – высота источника выбросов над уровнем земли (м);  $P$  (%) – среднегодовая повторяемость направления ветров рассматриваемого румба;  $P_0$  (%) – повторяемость направлений ветров одного румба при круговой розе ветров [21].

Оценка дымового воздействия проводилась в операционно-территориальных единицах (ОТЕ) размером 0,5\*0,5 км, построенных в 10 км буферной зоне вокруг г. Биробиджана. Метеорологические характеристики (дневная температура воздуха, направление и скорость ветра) получены по данным стационарной

метеостанции города. Электронные картосхемы интенсивности дымового воздействия созданы по авторскому алгоритму: нанесение источников загрязнения; построение полигональной области максимального загрязнения вокруг источников загрязнения; преобразование каждой области максимального воздействия в ОТЕ с учетом направления розы ветров и скорости ветра в день воздействия; определение количества источников загрязнения в каждой ОТЕ; тематическая обработка картосхем с выделением ОТЕ с различной интенсивностью воздействия: 1–3 – очень низкая, 4–6 – низкая, 7–9 – средняя, 10–12 – высокая, 13–15 – очень высокая. Реализация алгоритма выполнена в среде программирования MapBasic, входящая в пакет геоинформационной системы MapInfo Professional 9.0. Для подключения модуля к реляционной базе данных использована система управления Microsoft Access 2010.

Информация метеостанции хранится в таблицах «Погодные условия» и «Роза ветров». По данным таблицы «Горельники» создаются полигональные области дымового воздействия, и их итоговая декомпозиция размещается в таблице «Операционно-территориальные единицы». Для выполнения агрегирующих операций на электронных картосхемах применяются географические атрибуты MapInfoFOLD.

#### Результаты

В системе пирологического районирования Российской Федерации исследуемая территория относится к Инскому пирологическому району [24], для которого характерны различные по устойчивости к пожарам классы растительных формаций [25]. Например, к I-му классу (неустойчивые) относятся черноберзовые дубово-лиственничные редколесья в сочетании с ерником и ивовыми зарослями, осоково-вейниковые разнотравные луга, ко II-му (относительно неустойчивые) – кедрово-широколиственные леса, дубово-черноберзовые леса и к III-му (устойчивые) – белоберзовые леса. Из-за высокой плотности населенных пунктов приведенные формации находятся под постоянным антропогенным воздействием, например, рекреационным и хозяйственным. На основании данных об антропогенной пожароопасности в ЕАО исследуемая территория относится к I-ому (высокому) классу [7, 17]. Поэтому возникает необходимость в изучении региональных особенностей пожароопасности территории в окрестностях г. Биробиджана.

За анализируемый период на исследуемой территории зафиксировано 53 случая возгорания растительных горючих материалов с общей площадью 6360 га. Средний размер одного горельника составляет 120 га. Максимальное количество пожаров растительности приходилось на 2018 г. (12 возгораний). В наиболее пожароопасном месяце (апрель) средняя площадь горельника составляет 238 га, а в наименее пожароопасном (ноябрь) – 2,5 га (рис. 1).

Пожароопасность растительности на исследуемой территории в течение года распределена неравномерно. В весенний период (март–май) среднее количе-

ство пожаров за 10 лет составляет 1,3 возгораний со средней площадью горельника 204 га, а в осенний период (октябрь–ноябрь) – 0,7 возгораний и 10,5 га соответственно.

Для определения мест скопления пожаров растительности необходимо рассмотреть их пространственно-временное распределение по территории. Основное сосредоточение отмечено в западной, юго-западной и южной частях, что связано с близостью населенных пунктов, автомобильных и железнодорожных путей. В большинстве случаев горельники представлены точечно, многие из которых являются средними по размеру (21–200 га). В северо-западной и юго-восточной частях горельники представлены малыми по площади (0,2–5 га), крупные очаги возгорания (свыше 200 га) фиксировались на юго-западе и востоке (рис. 2).

Частота дымового воздействия на исследуемой территории зависит от изменения повторяемости направлений ветра. Анализ графиков розы ветров позволит выявить направления дымового переноса (рис. 3).

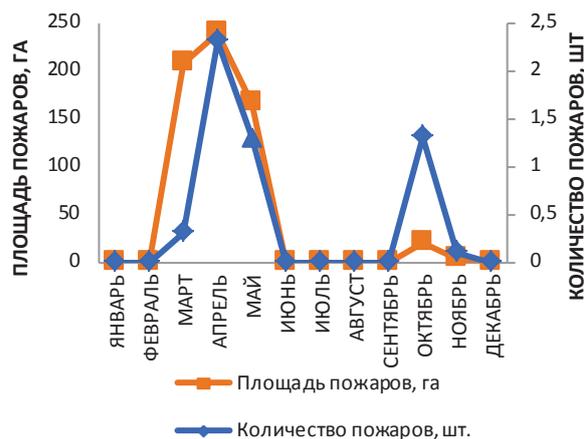


Рис. 1. Среднемесячная динамика пожаров в десятикилометровой зоне от г. Биробиджана за 2010–2015 и 2017–2020 гг.

Fig. 1. Average monthly dynamics of fires in a 10-kilometer zone from Birobidzhan for 2010–2015 and 2017–2020



Рис. 2. Горимость территории за 2010–2015 и 2017–2020 гг. в радиусе десятикилометровой зоны от г. Биробиджана

Fig. 2. Burning of the territory for 2010–2015 and 2017–2020 within a radius of 10-kilometer zone from Birobidzhan

Весной и осенью преобладают западные направления ветра (рис. 3, А, Б), а в мае – восточные (рис. 3, А). В результате дымовой перенос, соответствующий весеннему и осеннему периодам, фиксируется с запада на восток и с северо-запада на юго-восток. В мае

наблюдается противоположная ситуация. Построение картосхем, отражающих дымовое воздействие, выполнялось по вышеуказанным методикам на основе пространственно-временного анализа появления пожаров растительности в момент обнаружения (рис. 4).

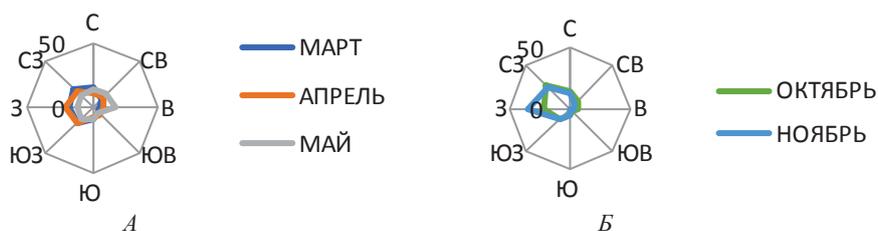


Рис. 3. Повторяемость направлений ветра на территории г. Биробиджана за пожароопасные периоды: А) весенний; Б) осенний

Fig. 3. Frequency of wind directions on the territory of Birobidzhan for fire periods: A) spring; B) autumn

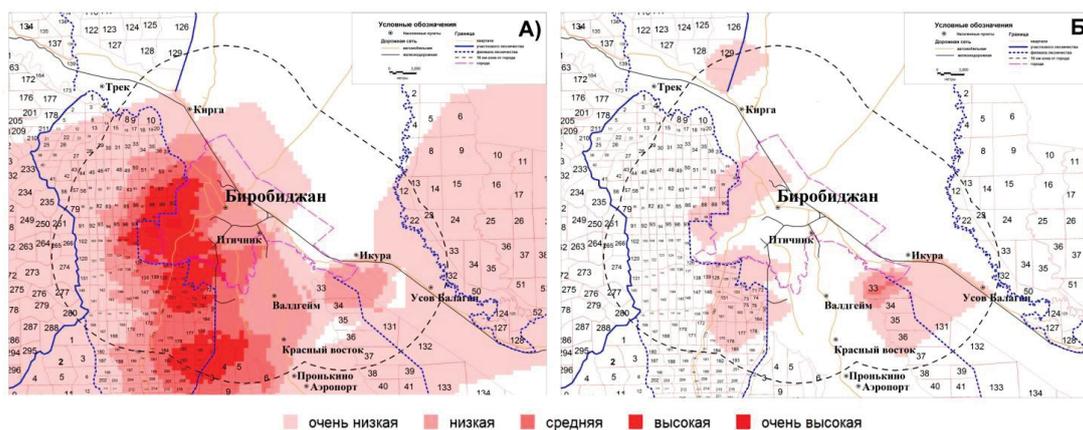


Рис. 4. Дымовое воздействие горельников на территории г. Биробиджана в пожароопасные периоды: А) весенний; Б) осенний

Fig. 4. Smoke impact of burners on the territory of Birobidzhan during fire periods: A) spring; B) autumn

Построение картосхем, отражающих интенсивность дымового воздействия, выполнялось на основе пространственно-временного анализа появления пожаров растительности в момент обнаружения (рис. 4). В весенний период было рассмотрено 39 случаев возгорания, в осенний – 14. Каждое возгорание является площадным источником, охватывающим кварталы лесничеств с таксационными характеристиками [26]. В качестве параметра для оценки мощности выброса площадных источников использован оксид углерода (СО) [22], значения которого получены по расчетной методике загрязнения выбросов при распространении лесного пожара А.М. Гришина в максимальной модели леса [27]. В результате получено, что в весенний период средняя мощность выброса СО составляла 4578,77 г/с, в осенний – 472,71 г/с. При анализе интенсивности дымового воздействия в пожароопасные периоды на территории г. Биробиджана проведено функциональное зонирование каждого источника для выделения зон различной интенсивности загрязнения по модели ОНД-86. Максимальные показатели зафиксированы в весенний период (рис. 4, А). Основная площадь дыма (87 %) сосредоточена в городской черте. Высокая интенсивность (11 % от площади города), которая фиксируется в природно-рекреационных зонах (городские леса) и индивидуальной застройке на юго-западе, характерна для западной части города. Для 20 % территории города характерна средняя интенсивность, которая отмечена в северо-западных и южных городских лесах и в индустриальной части на северо-западе.

Центральная жилая застройка города охвачена низкой интенсивностью дымового воздействия (25 %). Атмосферный воздух в северной и северо-восточной части города испытывает очень низкое дымовое воздействие (31 %). Задымление не фиксировалось на 13 % территории города.

В осенний период 73 % города не подвержено задымлению, а также отсутствуют максимальные степени интенсивности дымового воздействия на атмосферу (рис. 4, Б). На западных, южных и восточных окраинах фиксируется очень низкая интенсивность (26 %), а также небольшие площади города (1 %) на востоке подвержены низкому воздействию.

#### Заключение

Таким образом, в работе проведен пространственно-временной анализ появления пожаров растительности в десятикилометровой зоне от границы г. Биробиджана. За 10 лет максимальное количество пожаров растительности отмечено в весенний период (39 случаев), а наименьшее в осенний (14). Наибольшее количество возгораний фиксировалось в западной, юго-западной и южной частях исследуемой территории, особенно вблизи автомобильных и железнодорожных путей и населенных пунктов. В большинстве случаев горельники в северо-западной и юго-восточной частях представлены малыми (0,2–5 га), небольшими (5,1–20 га) и средними (7–9 га) по размеру, а на юго-западе крупными со средней площадью 630 га в год, крупные пожары (свыше 200 га).

Проведена оценка мощности выброса угарного газа по сезонам, наибольшее значение зафиксировано весной – 4578,77 г/с. Построение электронных картосхем интенсивности дымового воздействия в зависимости от направления ветра позволило определить районы города с разным уровнем загрязнением атмосферного воздуха. Весной максимальные показатели характерны для западной части города (городские леса и индивидуальная жилая застройка), а минимальные отмечаются на всей территории города в осенний период.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gonzalez S., Aller S.A., Chermant L. Fire hazard assessment at different scales in the wildland-urban interface of semiarid areas of northern Patagonia // *Frontiers in Forests and Global Change*. – 2022. – V. 5. – P. 1–14. DOI: 10.3389/ffgc.2022.855790.
- Vegetation fire in the Anthropocene / D.M.J.S. Bowman, C.A. Kolden, J.T. Abatzoglou, F.N. Johnston, van der Werf, M. Flannigan // *Nature Reviews Earth and Environment*. – 2020. – V. 1 (10). – P. 500–515. DOI: 10.1038/s43017-020-0085-3.
- Телицын Г.П., Острошенко В.В. К оценке экологических последствий лесных пожаров // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2008. – № 21-3. – С. 130–133.
- Forest fire occurrence prediction in China based on machine learning methods / Y. Pang, Y. Li, Z. Feng, Z. Zhao, S. Chen, H. Zhang // *Remote Sens*. – 2022. – V. 14 (21). – P. 5546. DOI: 10.3390/rs14215546
- Fowler C. Human health impacts of forest fires in the Southern United States: a literature review // *Journal of Ecological Anthropology*. – 2003. – V. 7. – P. 36–63. DOI: 10.5038/2162-4593.7.1.3.
- Вакуров А.Д. Лесные пожары на Севере. – М.: Наука, 1975. – 100 с.
- Зубарева А.М., Фелисов Д.М. Оценка антропогенной пожароопасности природно-территориальных комплексов Еврейской автономной области // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. – 2017. – № 5 (195). – С. 88–96.
- Шлотгауэр С.Д., Крюкова М.В. Воздействие пирогенного фактора на состояние растительного покрова в бассейне Амура // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. – 2008. – № 1 (137). – С. 59–68.
- Софронов М.А., Волокитина А.В. Пирологическое районирование в таежной зоне. – Новосибирск: Наука, 1990. – 205 с.
- Herbert C., Butsic V. Assessing the effectiveness of green landscape buffers to reduce fire severity and limit fire spread in California: case study of Golf courses // *Fire*. – 2022. – V. 5 (2). – P. 44. DOI: 10.3390/fire5020044.
- Bivolarski B. Environmental and social economic consequences of forest fires on the territory of Stara Zagora region // *Trakia Journal of Sciences*. – 2019. – V. 17 (2). – P. 159–164. DOI: 10.15547/tjs.2019.02.009.
- Дубровин Д.В., Гармышев В.В., Тимофеева С.С. Загрязнение атмосферы в результате горения лесных горючих материалов в сельтебной, ландшафтно-рекреационной, пригородной зонах городов и населенных пунктов Иркутской области // *XXI век. Техносферная безопасность*. – 2018. – Т. 3. – № 2 (10). – С. 35–43. DOI: 10.21285/2500-1582-2018-2-35-43.
- Махоткина Е.Л. Изменение мутности атмосферы во время лесных пожаров // *География и природные ресурсы*. – 1996. – № 3. – С. 19–24.
- Барановский Н.В. Прогнозирование лесной пожарной опасности в условиях антропогенной нагрузки. – Новосибирск: СО РАН, 2021. – 302 с.
- Numerical modelling of the impact on wildland-urban interface fires on Coimbra air quality / A.L. Miranda, J.H. Amorin, V. Martins, C. Pimentel, R. Rodrigues, R. Tavares, C. Borrego // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. – 2008. – V. 119. – P. 333–342. DOI: 10.2495/FIVA080331.
- Effects of long-range transported air pollution from vegetation fires on daily mortality and hospital admissions in the Helsinki metropolitan area, Finland / V. Kollanus, P. Tiittanen, J.V. Niemi, T. Lanki // *Environment Research*. – 2016. – V. 151. – P. 351–358. DOI: 10.1016/j.envres.2016.08.003.
- Дорошенко А.М. Антропогенная пожароопасность растительности на территории Еврейской автономной области // *Региональные проблемы*. – 2011. – Т. 14. – № 2. – С. 78–81.
- Zubareva A.M., Glagolev E.A., Grigorieva E.A. Characteristics of the spatial and temporal distribution of fire regime in one of the MOST fire prone region of the Russian Far East // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2021. – V. 14. – № 2. – P. 74–82. DOI: 10.24057/2071-9388-2020-159.
- Прогноз вероятности возникновения очагов природных пожаров // *МЧС России. Главное управление по Еврейской автономной области*. URL: <https://79.mchs.gov.ru/deyatelnost/poleznaya-informaciya/pozharoопасnyy-period/prognoz-veroyatnosti-vozniknoveniy-a-ochagov-prirodnih-pozharov> (дата обращения 25.12.2022).
- Шешуков М.А. Лесопожарное районирование Дальнего Востока. – Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1982. – 31 с.
- Петров Е.С., Новороцкий П.В., Леншин В.Т. Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области. – Владивосток; Хабаровск: Дальнаука, 2000. – 174 с.
- Зайченко О.В. Разработка методов оценки воздействия лесного пожара на воздушную среду населенных территорий: дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 2005. – 132 с.
- Коган Р.М., Глаголев В.А. Использование ГИС для обработки данных по экологическому состоянию городской территории // *География и природные ресурсы*. – 2004. – Спец. Вып. – С. 167–171.
- Шешуков М.А. Виды, интенсивность пожаров и определяющие их факторы // *Лесное хозяйство*. – 1977. – № 5. – С. 68–72.
- Дорошенко А.М. Анализ факторов, влияющих на пространственное распространение пожаров растительности на территории Еврейской автономной области // *Региональные проблемы*. – 2008. – № 9. – С. 83–87.
- Лесной план Еврейской автономной области. URL: [https://www.eao.ru/upload/medialibrary/5ef/proekt\\_2018\\_19s.pdf](https://www.eao.ru/upload/medialibrary/5ef/proekt_2018_19s.pdf) (дата обращения 19.01.2023).
- Гришин А.М., Долгов А.А., Цимбалюк А.Ф. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. – Москва: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1997. – 26 с.

Поступила: 10.01.2023 г.

Дата рецензирования: 10.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Зубарева А.М.**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологических и геоэкологических исследований Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

**Глаголев В.А.**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологических и геоэкологических исследований Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

**Жучков Д.В.**, младший научный сотрудник лаборатории геологических и геоэкологических исследований Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

UDC 630\*431:504.4(571.621)

## INFLUENCE OF VEGETATION FIRES ON THE STATE OF ATMOSPHERIC AIR IN BIROBIDZHAN

Anna M. Zubareva<sup>1</sup>,  
anna-doroshenko@yandex.ru

Vladimir A. Glagolev<sup>1</sup>,  
glagolev-jar@yandex.ru

Dmitriy V. Zhuchkov<sup>1</sup>,  
dmitriy.zhuchkov.2000@mail.ru

<sup>1</sup> Institute for Complex Analysis of Regional Problems Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, 4, Sholom-Aleikhem street, Birobidzhan, 679016, Russia.

**The relevance.** About 50 % of the population of the Jewish Autonomous Region lives on the territory of Birobidzhan and a 10-kilometer zone from its border. In this regard, it is important to analyze the features of the spread of vegetation fires in the vicinity of the city and the intensity of smoke exposure.

**The main aim:** analysis of the influence of vegetation fires on the state of atmospheric air in Birobidzhan.

**Objects:** vegetation fires in a 10-kilometer zone from the border of Birobidzhan.

**Methods.** The work is based on the data about the number of fires in the vicinity of Birobidzhan for 2010–2015 and 2017–2020 according to the Department of Forest Management of the Government of the Jewish Autonomous Region. To display the spread of fires, a vegetation burnability map was made in the study area in the MapInfo Professional 9.0 geoinformation system. The analysis of smoke transport was carried out using wind rose graphs. The basis for the construction of maps reflecting the smoke effect was an upgraded formula for modeling Sutton emissions and a method for calculating concentrations of harmful impurities in the atmospheric air OND-86. The author's algorithm is implemented in the MapBasic programming environment, which is included in the MapInfo Professional 9.0 geoinformation system package. A scale of the intensity of smoke exposure to the atmosphere for the studied area is obtained.

**Results.** The most and least fire-hazardous months for 2010–2015 and 2017–2020 were identified. Territories that are constantly exposed to vegetation fires were marked. In accordance with the graphs of the wind rose, cartograms reflecting the intensity of the smoke effect on the atmosphere of Birobidzhan were made.

**Key words:**

Vegetation fires, fire hazard, burning of the territory, smoke transfer, smoke exposure, Birobidzhan, wind direction.

**REFERENCES**

- Gonzalez S., Aller S.A., Chermant L. Fire hazard assessment at different scales in the wildland-urban interface of semiarid areas of northern Patagonia. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2022, pp. 1–14. DOI: 10.3389/ffgc.2022.855790.
- Bowan D.M.J.S., Kolden C.A., Abatzoglou J.T., Johnston F.N., Van der Werf C.R., Flannigan M. Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, vol. 1 (10), pp. 500–515. DOI: 10.1038/s43017-020-0085-3.
- Telicyn G.P., Ostroshenko V.V. To assess the environmental consequences of forest fires. *Actual problems of the forest complex*, 2008, no. 21-3, pp. 130–133. In Rus.
- Pang Y., Li Y., Feng Z., Feng Z., Zhao Z., Chen S., Zhang H. Forest fire occurrence prediction in China based on machine learning methods. *Remote Sens*, 2022, vol. 14 (21), pp. 5546. DOI: 10.3390/rs14215546.
- Fowler C. Human health impacts of forest fires in the Southern United States: a literature review. *Journal of Ecological Anthropology*, 2003, vol. 7, pp. 36–63. DOI: 10.5038/2162-4593.7.1.3.
- Vakurov A.D. *Lesnye pozhary na Severe* [Forest fires in the North]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 100 p.
- Zubareva A.M., Fetisov D.M. Assessment of anthropogenic fire hazard of natural-territorial complexes of the Jewish Autonomous Region. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 5 (195), pp. 88–96. In Rus.
- Schlotgauer S.D., Kryukova M.V. The effect of the pyrogenic factor on the state of vegetation cover in the Amur basin. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2008, no. 1 (137), pp. 59–68. In Rus.
- Sofronov M.A., Volokitina A.B. *Pirologicheskoe rayonirovaniye v tayozhnoy zone* [Pyrological zoning in the taiga zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 205 c.
- Herbert C., Butsic V. Assessing the effectiveness of green landscape buffers to reduce fire severity and limit fire spread in California: case study of Golf courses. *Fire*, 2022, vol. 5 (2), pp. 44. DOI: 10.3390/fire5020044.
- Bivolarski B. Environmental and social economic consequences of forest fires on the territory of Stara Zagora region. *Trakia Journal of Sciences*, 2019, vol. 17 (2), pp. 159–164. In Rus. DOI: 10.15547/tjs.2019.02.009.
- Dubrovina D.V., Garmyshev V.V., Timofeeva S.S. Zagryaznenie atmosfery v rezultate goreniya lesnykh goryuchikh materialov v selitebnoy, landshaftno-rekreatsionnoy, prigorodnoy zonakh gorodov i naseleennykh punktov Irkutskoy oblasti [Atmospheric pollution as a result of burning of forest combustible materials in residential, landscape and recreational, suburban areas of cities and settlements of the Irkutsk region]. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost*, 2018, vol. 3, no. 2 (10), pp. 35–43.
- Makhotkina E.L. Izmeneniye mutnosti atmosfery vo vremya lesnykh pozharov [Change in atmospheric turbidity during forest fires]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 1996, no. 3, pp. 19–24.
- Baranovskiy N.V. *Prognozirovaniye lesnoy pozharoy opasnosti v usloviya antropogennoy nagruzki* [Forecasting of forest fire danger in conditions of anthropogenic load]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2021. 302 p.
- Miranda A.L., Amorin J.H., Martins V., Pimentel C., Rodrigues R., Tavares R., Borrego C. Numerical modelling of the impact on wildland-urban interface fires on Coimbra air quality. *Modelling, WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2008, vol. 119, pp. 333–342. DOI: 10.2495/FIV A080331.
- Kollanus V., Tiittanen P., Niemi J.V., Lanki T. Effects of long-range transported air pollution from vegetation fires on daily mortality and hospital admissions in the Helsinki metropolitan area, Finland. *Environment Research*, 2016, vol. 151, pp. 351–358. DOI: 10.1016/j.envres.2016.08.003.
- Doroshenko A.M. Antropogennaya pozharoopasnost rastitelnosti na territorii Evreyskoy avtonomnoy oblasti [Anthropogenic fire hazard of vegetation on the territory of the Jewish Autonomous Region]. *Regionalnye problemy*, 2011, vol. 14, no. 2, pp. 78–81.

18. Zubareva A.M., Glagolev E.A., Grigorieva E.A. Characteristics of the spatial and temporal distribution of fire regime in one of the MOST fire prone region of the Russian Far East. *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 74–82. DOI: 10.24057/2071-9388-2020-159.
19. *Forecast of the probability of occurrence of foci of natural fires* [Forecast of the probability of occurrence of natural fires]. Available at: <https://79.mchs.gov.ru/deyatelnost/poleznaya-informaciya/pozharoопасnyy-period/prognoz-veroyatnosti-vozniknoveniya-ochagov-prirodnih-pozharov> (accessed 25 December 2022).
20. Sheshukov M.A. *Lesopozharnoe rayonirovanie Dalnego Vostoka* [Forest fire zoning of the Far East]. Khabarovsk, DalNIL X, 1982. 31 p.
21. Petrov E.S., Novorotskiy P.V., Lenshin V.T. *Klimat Khabarovskogo kraya i Evreyskoy avtonomnoy oblasti* [The climate of the Khabarovsk Territory and the Jewish Autonomous Region]. Vladivostok, Khabarovsk, Dalnauka Publ., 2000. 174 p.
22. Zaychenko O.V. *Razrabotka metodov otsenki vozdeystviya lesnogo pozhara na vozdushnyuyu sredyu naselennykh territoriy*. Diss. Kand. nauk [Development of methods for assessing the impact of forest fire on the air environment of populated areas. Cand. Diss.]. Vladivostok, 2005. 132 p.
23. Sheshukov M.A. Vidy, intensivnost pozharov i opredelyayushchie ikh faktory [Types, intensity of fires and their determining factors]. *Lesnoe khozyaystvo*, 1977, no. 5, pp. 68–72.
24. Kogan R.M., Glagolev V.A. Ispolzovanie GIS dlya obrabotki dannykh po ekologicheskomu sostoyaniyu gorodskoy territorii [Using GIS to process data on the ecological state of the urban area]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2004, Special Issue, pp. 167–171.
25. Doroshenko A.M. Analiz faktorov, vliyayushchikh na prostanstvennoe rasprostranenie pozharov rastitelnosti na territorii Evreyskoy avtonomnoy oblasti [Analysis of factors affecting the spatial spread of vegetation fires in the territory of the Jewish Autonomous Region]. *Regionalnye problemy*, 2008, no. 9, pp. 83–87.
26. *Lisnoj plan Evreyskoj avtonomnoj oblasti* [Forest plan of the Jewish Autonomous Region]. Available at: [https://www.eao.ru/upload/medialibrary/5ef/proekt\\_2018\\_19s.pdf](https://www.eao.ru/upload/medialibrary/5ef/proekt_2018_19s.pdf) (accessed 19 January 2023).
27. Grishin A.M., Dolgov A.A., Cimbalyuk A.F. *Metodika opredeleniya i rascheta vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot lesnykh pozharov* [Methodology for determining and calculating emissions of pollutants from forest fires]. Moscow, Gosudarstvenny komitet Rossiyskoy Federatsii po okhrane okruzhayushchey sredy, 1997. 26 p.

Received: 10 January 2023.

Reviewed: 10 February 2023.

#### Information about the authors

**Anna M. Zubareva**, Cand. Sc., senior researcher, Institute for Complex Analysis of Regional Problems Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences.

**Vladimir A. Glagolev**, Cand Sc., senior researcher, Institute for Complex Analysis of Regional Problems Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences.

**Dmitriy V. Zhuchkov**, junior research, Institute for Complex Analysis of Regional Problems Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences.

УДК 622.276.66

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Хижняк Григорий Петрович<sup>1</sup>,  
xgr@mail.ru

Диенг Ассан<sup>1</sup>,  
diengassane90@hotmail.com

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность.** Гидравлический разрыв пласта в добывающих и нагнетательных скважинах является одним из эффективных методов повышения нефтеотдачи пластов, вовлечения в разработку низкопроницаемых зон и пропластков, механизмом более широкого охвата продуктивных зон заводнением, что позволяет перевести часть забалансовых запасов в промышленные. По мнению экспертов, применение гидроразрыва пласта позволяет увеличить коэффициент извлечения нефти и газа на 10–15 %. В настоящее время большинство нефтяных месторождений Пермского края находятся на завершающей стадии разработки. Эти месторождения, как правило, характеризуются наличием недренируемых зон с остаточными запасами и низкими дебитами скважин. Большая часть остаточных запасов месторождений сосредоточена в низкопроницаемых коллекторах с высокой степенью неоднородности и затрудненной фильтрацией флюидов. Повышение продуктивности скважин этих эксплуатационных объектов достигается за счет применения различных геолого-технических мероприятий.

**Цель:** разработать методику прогнозирования дебита нефти после гидравлического разрыва пласта с учетом технологических характеристик объектов.

**Объекты:** Каширские и Подольские карбонатные отложения одного из месторождений Пермского края.

**Методы:** корреляционный и регрессионный анализ.

**Результаты.** Метод гидроразрыва пласта широко применяется для увеличения продуктивности скважин. К сожалению, полученные на практике дебиты нефти не всегда соответствуют предварительным расчетам. На примере одного из месторождений Пермского края предложен метод, позволяющий по значениям технологических параметров продуктивных отложений методами математической статистики оценить начальный дебит нефти после гидравлического разрыва пласта. Получено хорошее согласие модельных и экспериментальных результатов.

### Ключевые слова:

Гидроразрыв, нефтеотдача пласта, дебит нефти, технологические параметры, карбонатные коллекторы, регрессионный анализ.

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одним из наиболее эффективных методов увеличения нефтеотдачи [1–12] и в то же время одним из самых дорогостоящих.

При использовании ГРП отмечаются тенденции к увеличению обводненности, а также резкому снижению продуктивности скважины. Это потребовало применения многостадийного ГРП, а также повторных операций ГРП [13]. Ввиду изменения поля напряжений, по сравнению с одноэтапным ГРП, меняется картина распространения трещины, что приводит к подключению ранее нефилльтруемых участков [14].

В связи с изложенным встает задача прогнозирования эффективности операций ГРП. На эффективность ГРП, несомненно, влияют как геологические, так и технологические параметры [15–19]. К сожалению, полученные на практике дебиты нефти не всегда соответствуют предварительным расчетам.

Для одного из месторождений Пермского края было рассмотрено влияние геологических параметров на начальный дебит нефти после ГРП [20–22].

В настоящей работе предложен метод, позволяющий по значениям технологических параметров продуктивных отложений методами математической статистики спрогнозировать начальный дебит нефти по-

сле гидроразрыва. Объектом исследования послужили каширские (К) и подольские (Пд) карбонатные отложения. Имеются данные о начальном дебите нефти ( $Q_n$ ) после ГРП и нескольких технологических параметрах по 12 скважинам. В качестве технологических параметров, влияющих на эффективность ГРП, приняты: обводненность до ГРП ( $K_b$ ), пластовое давление до ГРП ( $P_{пл}$ ), удельный расход пропанта ( $q_n$ ), расчлененность ( $K_p$ ), давление смыкания на забое ( $P_{сз}$ ) и дебит жидкости до ГРП ( $Q_ж$ ) (табл. 1).

Для парных зависимостей определены коэффициенты корреляции ( $r$ ) и уровни статистической значимости ( $p$ ) (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что начальный дебит нефти после ГРП  $Q_n$  хорошо коррелирует с удельным расходом пропанта ( $q_n$ ), расчлененностью ( $K_p$ ), давлением смыкания на забое ( $P_{сз}$ ) и дебитом жидкости до ГРП ( $Q_ж$ ). В то же время существуют статистически значимые связи между:

- дебитом жидкости ( $Q_ж$ ) с пластовым давлением ( $P_{пл}$ ) и удельным расходом пропанта ( $q_n$ );
- давлением смыкания на забое ( $P_{сз}$ ) с удельным расходом пропанта ( $q_n$ ) и расчлененностью ( $K_p$ );
- пластовым давлением ( $P_{пл}$ ) и удельным расходом пропанта ( $q_n$ ).

**Таблица 1.** Характеристики объектов разработки каширских и подольских карбонатных отложений при проведении ГРП на скважинах месторождения Пермского края

**Table 1.** Characteristics of the Kashir and Podolsk carbonate reservoirs during hydraulic fracturing of one Permian oil field wells

Дебит нефти после ГРП $Q_n$ , т/сут Oil flow rate pre-frac $Q_o$ , t/day	Обводненность до ГРП $K_w$ , % Water cut pre-frac $W_c$ , %	Пластовое давление до ГРП $P_{пл}$ , МПа Reservoir pressure pre-frac $P_f$ , MPa	Удельный расход пропанта $q_n$ , т/м Specific proppant consumption $q_p$ , t/m	Расчлененность $K_p$ , ед. Reservoir compartmentalization $C_i$ , units	Давление смыкания на забое $P_{сз}$ , атм Closing pressure downhole $P_c$ , atm	Дебит жидкости до ГРП $Q_ж$ , м <sup>3</sup> /сут Liquid production rate pre-frac $Q_l$ , m <sup>3</sup> /day
6,0	25,7	7,9	7,2	1	191	2,4
6,7	36,0	3,4	10,43	3	138,8	3,7
6,1	36,0	4,09	10,17	2	161,1	3,0
4,4	0,0	7	5,31	1	245	0,0
5,5	33,0	8,63	6,45	2	161	1,0
6,0	32,6	7,17	10,19	4	156	1,7
4,9	41,9	7,891	7,26	2	163,4	1,9
5,6	20,4	7,822	8,59	2	166	0,5
6,0	20,6	5,09	8,90	4	155,5	2,3
5,6	20,5	5,806	6,08	2	186	1,8
7,0	10,5	6,218	8,11	4	120,7	1,9
5,0	10,5	6,218	8,03	1	173,3	1,3

Для параметров исходной выборки с высокими коэффициентами корреляции и низкими уровнями статистической значимости построены корреляционные поля (рис. 1).

По значениям коэффициентов корреляции технологических параметров с дебитом нефти  $Q_n$  и уровня статистической значимости определяется степень влияния этих параметров на начальный дебит нефти после ГРП. С использованием регрессионного анализа строится многомерное уравнение регрессии, в котором зависимой переменной выступает модельное значение дебита нефти  $Q_n^{Teop}$ , а независимыми – параметры выборки, для которых уровень статистической значимости  $p < 0,05$ .

В общем виде уравнение записывается следующим образом:

$$Q_n^{Teop} = a_0 + a_1 q_n + a_2 K_p + a_3 P_{сз} + a_4 Q_ж,$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_4$  – регрессионные коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

По данным выборки методом пошагового регрессионного анализа было построено многомерное уравнение для оценки модельных значений начального дебита нефти после ГРП:

$$Q_n^{Teop} = 5,093 + 0,052q_n + + 0,154K_p - 0,009P_{сз} + 0,5999Q_ж,$$

при  $R^2 = 0,82, p < 0,08, N = 12$ , где  $R^2$  – коэффициент детерминации,  $N$  – объем выборки.

Сопоставление модельных и фактических значений дебита нефти после ГРП приведено на рис. 2.

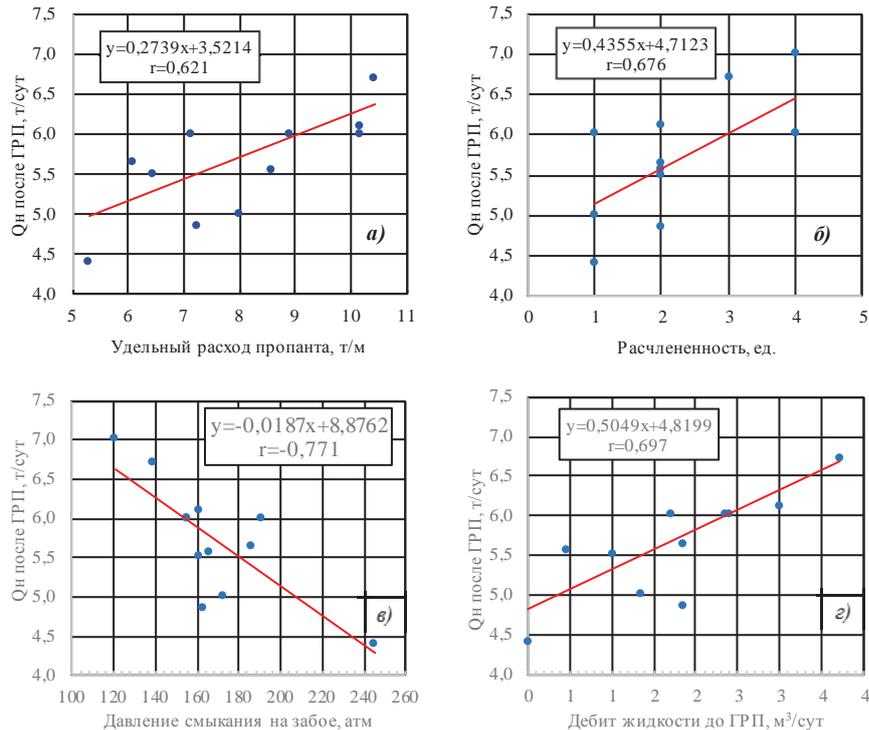
**Таблица 2.** Корреляционная матрица для выборки Каширских и Подольских карбонатных отложений месторождения Пермского края

**Table 2.** Correlation matrix for a sample of Kashira and Podolsk carbonate deposits of one Permian oil field

	$Q_n$ , т/сут $Q_o$ , t/day	$K_w$ , % $W_c$ , %	$P_{пл}$ , МПа $P_f$ , MPa	$q_n$ , т/м $q_p$ , t/m	$K_p$ , ед. $C_i$ , units	$P_{сз}$ , атм $P_c$ , atm	$Q_ж$ , м <sup>3</sup> /сут $Q_l$ , m <sup>3</sup> /day
$Q_n$ , т/сут $Q_o$ , t/day	1	$r=0,2502$ $p=0,433$	$r=-0,4852$ $p=0,110$	$r=0,6205$ $p=0,031$	$r=0,6764$ $p=0,016$	$r=-0,7714$ $p=0,003$	$r=0,6973$ $p=0,012$
$K_w$ , % $W_c$ , %		1	$r=-0,0710$ $p=0,826$	$r=0,4716$ $p=0,122$	$r=0,1965$ $p=0,541$	$r=-0,4570$ $p=0,135$	$r=0,5735$ $p=0,051$
$P_{пл}$ , МПа $P_f$ , MPa			1	$r=-0,5771$ $p=0,049$	$r=-0,3162$ $p=0,317$	$r=0,2985$ $p=0,346$	$r=-0,7102$ $p=0,010$
$q_n$ , т/м $q_p$ , t/m				1	$r=0,5666$ $p=0,055$	$r=-0,6642$ $p=0,018$	$r=0,6420$ $p=0,024$
$K_p$ , ед. $C_i$ , units					1	$r=-0,7163$ $p=0,009$	$r=0,3638$ $p=0,245$
$P_{сз}$ , атм $P_c$ , atm						1	$r=-0,5624$ $p=0,057$
$Q_ж$ , м <sup>3</sup> /сут $Q_l$ , m <sup>3</sup> /day							1

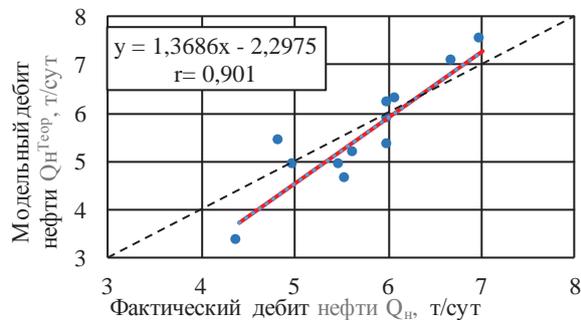
Примечание: в числителе указано значение коэффициента корреляции, в знаменателе – уровень статистической значимости ( $p$ ); красным выделены статистически значимые коэффициенты корреляции, для которых  $p < 0,05$ .

Note: the numerator indicates the value of the correlation coefficient, the denominator indicates the level of statistical significance ( $p$ ); statistically significant correlation coefficients, for which  $p < 0,05$  are highlighted in red.



**Рис. 1.** Зависимости прогнозируемого начального дебита нефти после ГРП с технологическими параметрами: а) удельный расход пропанта; б) расчлененность; в) давление смыкания на забое; г) дебит жидкости до ГРП

**Fig. 1.** Dependencies of predicted initial oil flow rate after hydraulic fracturing with technological parameters: а) specific proppant consumption; б) reservoir compartmentalization; в) closing pressure downhole; г) liquid production rate pre-frac



**Рис. 2.** Корреляционное поле модельных ( $Q_n^{теор}$ ) и фактических ( $Q_n$ ) значений начального дебита нефти после ГРП для скважин Каширских и Подольских карбонатных отложений месторождения Пермского края

**Fig. 2.** Correlation field of model ( $Q_n^{theor}$ ) and actual ( $Q_n$ ) values of the initial oil production rate after hydraulic fracturing for wells of the Kashirsky and Podolsk carbonate deposits of the Perm region field

Абсолютное отклонение модельных значений начального дебита нефти от его фактических значений на промысле находится в диапазоне от 0,1 до 1,1 при среднем – 0,5 т/сут. Относительное отклонение – в диапазоне 1,87 до 24,62 % при среднем 8,86 %.

### Выводы

В результате выполненных исследований установлено:

1. На значение начального дебита нефти после ГРП в Каширских и Подольских карбонатных отложениях одного из месторождений Пермского края основное влияние оказывают удельный расход пропанта, расчлененность, давление смыкания на забое и дебит жидкости до ГРП.
2. Предложенный способ позволяет с использованием технологических параметров объекта прогнозировать значение начального дебита нефти после ГРП до его проведения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Appah D. Application of the theory of diffuse set to optimize hydraulic fracturing // Journal of Petrol. Science and Eng. – 1994. – V. 2. – P. 335–340.
2. Ruiting Wu. Some fundamental mechanisms of hydraulic fracturing: dissertation. – Atlanta: Georgia, 2006. – 301 p. URL: <https://repository.gatech.edu/bitstreams/b33c7c1f-13d2-4e54-8343-b57565cf754a/download> (дата обращения 15.01.2023).
3. A study on the optimization of fracturing operation parameters based on PCA- BNN / Tan Chaodong, He Jiayuan, Zhou Tong, Liu Jiankang, Song Wenrong // J. Southwest Pet Univ. (Sci Technol Ed). – 2020. – V. 42 (6). – P. 56–62.
4. Zhou D., He P. Major factors affecting simultaneous frac results // SPE Production and Operations Symposium, Proceedings. – 2015. – V. 2015. – P. 532–545. DOI:10.2118/173633-MS.
5. Reliability analysis models for hydraulic fracturing / H. Zhao, Li Zhen, C. Zhu, Z. Ru // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 162. – P. 150–157. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pet-ol.2017.12.048> (дата обращения 15.01.2023).

6. Gao Haihong, Qu Zhanqing, Zhao Mei. Experimental study on the factors affecting the productivity of fractured horizontal well // Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition. – 2008. – V. 30 (4). – P. 73–76.
7. Factors affecting productivity of stage fractured horizontal well / T. Ruzhong, W. Qingzhi, S. Jian, Q. Zhanqing // Petroleum Drilling Techniques. – 2010. – V. 38 (2). – P. 80–83.
8. Evaluating horizontal well placement and hydraulic fracture spacing conductivity in the Bakken Formation North Dakota / E.P. Lolon, C.L. Cipolla, L. Weijers, R.E. Hesketh, M.W. Grigg // SPE Annual Technical Conference and Exhibition – New Orleans, Louisiana, October 2009. URL: <https://doi.org/10.2118/124905-MS> (дата обращения 15.01.2023).
9. Liu Yinghong, Li Zongtian, Zhao Bihua. Optimization of fracturing project for low permeable reservoir with orthogonal and analysis of experiments // Fault-Block Oil & Gas Field. – 2000. – V. 7 (3). – P. 46–49.
10. Иванов С.А., Растегаев А.В., Галкин В.И. Анализ результатов применения ГРП (на примере Повховского месторождения нефти) // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 7. – С. 54–58.
11. Колтырин А.Н. Опыт применения пропантного ГРП на терригенном коллекторе // Геология геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 4. – С. 28–31.
12. Колтырин А.Н. Повышение эффективности технологии ГРП на карбонатном типе коллектора // Нефтепромысловое дело. – 2016. – № 10. – С. 28–30.
13. Иванов С.И. Интенсификация притока нефти и газа к скважинам. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». – 2006. – 556 с.
14. Трофимов А.С. Бердников С.В., Платонов И.Е. Гидродинамические методы повышения нефтеотдачи пластов. – СПб.: Профессинал, 2010. – 252 с.
15. Егоров Д.С., Михайлов Н.Н. Влияние геологических факторов на динамику дебитов скважин в отложениях баженовской свиты // Нефтепромысловое дело. – 2022. – № 10 (646). – С. 5–16. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-10(646)-5-16
16. Галкин В.И., Кондрагьев С.А., Путилов И.С. Разработка методики оценки эффективности гидроразрыва пласта по комплексу геолого-технологических показателей (на примере визейского терригенного нефтегазосного комплекса Куединского вала нефтяных месторождений Пермского края) // Нефтепромысловое дело. – 2015. – № 7. – С. 23–26.
17. Галкин В.И., Колтырин А.Н. Разработка методики прогнозирования технологических показателей работы скважины после применения геолого-технических мероприятий // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 7 (619). – С. 18–28.
18. Колтырин А.Н. Разработка методики и оценка эффективности работы способности вероятностно-статистических моделей для прогнозирования прироста дебита нефти в скважинах после проведения гидроразрыва пласта // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 4 (364). – С. 49–58. – DOI: 10.33285/2413-5011-2022-4(364)-49-58
19. Фархутдинова М.Х. Анализ влияния геолого-технологических параметров скважин и процесса гидравлического разрыва пласта на его эффективность // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2014. – № 3. – С. 33–48. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3\\_2014/ogbus\\_3\\_2014\\_p33-48\\_FarhutdinovaMKh\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2014/ogbus_3_2014_p33-48_FarhutdinovaMKh_ru.pdf) (дата обращения 15.01.2023).
20. Диенг Ассан, Хижняк Г.П. Прогноз эффективности гидравлического разрыва пласта по геологическим показателям // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 1 (649). – С. 25–28. DOI: 10.33285/0207-2351-2023-1(649)-25-28
21. Диенг А., Хижняк Г.П. Analysis of the efficiency of hydraulic fracturing on the example of the oil field in the Perm region // Инновационные исследования: Опыт, проблемы внедрения результатов и пути решения: сборник статей Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции с международным участием. – Киров, 22 октября 2022. – Уфа: OMEGA SCIENCE, 2022. – С. 240–244.
22. Диенг А., Хижняк Г.П. Использование геологических параметров продуктивных отложений для прогноза эффективности гидроразрыва // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы XV Международной науч.-техн. конф. – Пермь, Екатеринбург, 18–21 октября 2022. – С. 207–212.

Поступила: 31.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 07.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Хижняк Г.П.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Диенг А.**, аспирант, ассистент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276.66

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON HYDRAULIC FRACTURING EFFICIENCY

Grigorii P. Khizhniak<sup>1</sup>,  
xgp@mail.ru

Assane Dieng<sup>1</sup>,  
diengassane90@hotmail.com

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

**Relevance.** Hydraulic fracturing in production and injection wells is one of the effective method for enhancing oil recovery, involving low-permeability zones and interlayers in the development, a mechanism for a wider coverage of productive zones by waterflooding, which makes it possible to convert part of off-balance reserves into commercial ones. According to experts, the use of hydraulic fracturing can increase the oil and gas recovery factor by 10–15%. Currently, most of the oil fields in the Perm Territory are at the final stage of development. These fields, as a rule, are characterized by non-draining zones with residual reserves and low well flow rates. Most of the remaining reserves of the fields are concentrated in low-permeability reservoirs with a high degree of heterogeneity and difficult fluid filtration. The increase in the productivity of wells of these production facilities is achieved through the use of various geological and technical measures.

**The main aim:** to develop a methodology for predicting the oil production rate post-frac with parameters that influence more, taking into account geological and technological characteristics of the object.

**Objects:** Kashirskiy and Podolskiy carbonate deposits on one of the Permian fields.

**Methods:** correlation and regression analysis.

**Results.** The hydraulic fracturing method is widely used to increase well productivity. Unfortunately, oil flow rates obtained in practice do not always correspond to preliminary calculations. Using the example of one of the fields in the Perm Territory, a method proposed that allows estimating the initial oil production rate after hydraulic fracturing using the values of the technological parameters of productive deposits and the methods of mathematical statistics. A good agreement between model and experimental results was obtained.

**Key words:**

Hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, oil flow rate, technological parameters, carbonate reservoirs, regression analysis.

## REFERENCES

- Appah D. Application of the theory of diffuse set to optimize hydraulic fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1994, vol. 2, pp. 335–340.
- Ruiting Wu. *Some fundamental mechanisms of hydraulic fracturing*. Diss. Atlanta, Georgia, 2006. 301 p. Available at: <https://repository.gatech.edu/bitstreams/b33c7c1f-13d2-4e54-8343-b57565cf754a/download> (accessed 15 January 2023).
- Tan Chaodong, He Jiayuan, Zhou Tong, Liu Jiankang, Song Wenrong. A study on the optimization of fracturing operation parameters based on PCA-BNN. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2020, vol. 42 (6), pp. 56–62. DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.05.12.05
- Zhou D., He P. Major factors affecting simultaneous frac results. *SPE Production and Operations Symposium, Proceedings*, 2015, vol. 2015, pp. 532–545. DOI:10.2118/173633-MS
- Zhao H., Zhen Li, Zhu C., Ru Z. Reliability analysis models for hydraulic fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 162, pp. 150–157. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.048> (accessed 15 January 2023).
- Gao Hai-hong, Qu Zhan-qing, Zhao Mei. Experimental study on the factors affecting the productivity of fractured horizontal well. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2008, vol. 29 (4), pp. 73–76. DOI: 10.3863/j.issn.1000-
- Ruzhong T., Qingzhi W., Jian S., Zhanqing Q. Factors affecting productivity of stage fractured horizontal well. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, vol. 38 (2), pp. 80–83.
- Lolon E.P., Cipolla C.L., Weijers L., Hesketh R.E., Grigg M.W. Evaluating horizontal well placement and hydraulic fracture spacing conductivity in the Bakken Formation, North Dakota. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, October 2009. Available at: <https://doi.org/10.2118/124905-MS> (accessed 15 January 2023).
- Liu Yinghong, Li Zongtian, Zhao Bihua. Optimisation of fracturing project for low permeable reservoir with orthogonal and analysis of experiments. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2000, vol. 7 (3), pp. 46–49.
- Ivanov S.A., Rastegayev A.V., Galkin V.I. Analysis of results of hydraulic fracturing (on the example of Povkhovskoye oil field). *Oilfield engineering*, 2010, no. 7, pp. 54–58. In Rus.
- Koltyrin A.N. Opyt primeneniya propantnogo GRP na terrigenom kollektore [Experience in the use of proppant hydraulic fracturing in a terrigenous reservoir]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefiannykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2016, no. 4, pp. 28–31.
- Koltyrin A.N. Povyshenie effektivnosti tekhnologii GRP na karbonatnom tipe kollektora [Increasing the efficiency of hydraulic fracturing technology on a carbonate type of reservoir]. *Neftepromyslovoe delo*, 2016, no. 10, pp. 28–30.
- Ivanov S.I. *Intensifikatsiya pritoka nefi i gaza k skvazhinam* [Intensification of oil and gas flow to wells]. Moscow, Nedra-Business Center Publ., 2006. 556 p.
- Trofimov A.S., Berdnikov S.V., Platonov I.E. *Gidrodinamicheskie metody povysheniya nefteodachi plastov* [Hydrodynamic methods of enhanced oil recovery]. St. Petersburg. Professional Publ., 2010. 252 p.
- Egorov D.S., Mikhaylov N.N. Vliyaniye geologicheskikh faktorov na dinamiku debitov skvazhin v otlozheniyakh bazhenovskoy svity [The influence of geological factors on the dynamics of well flow rates in the deposits of the Bazhenov formation]. *Neftepromyslovoe delo*, 2022, no. 10 (646), pp. 5–16.
- Galkin V.I., Kondratyev S.A., Putilov I.S. Razrabotka metodiki otsenki effektivnosti gidrorazryva plasta po kompleksu geologo-tekhnologicheskikh pokazateley (na primere vizeyskogo terrigenogo neftegazonosnogo kompleksa Kuyedinskogo vala nefiannykh mestorozhdeniy Permskogo kraya) [Development of a methodology for assessing the effectiveness of hydraulic fracturing by a set of geological and technological indicators (on the example of the Visean terrigenous oil and gas complex of the Kuedinsky shaft of oil fields in the Perm region)]. *Neftepromyslovoe delo*, 2015, no. 7, pp. 23–26.
- Galkin V.I., Koltyrin A.N. Razrabotka metodiki prognozirovaniya tekhnologicheskikh pokazateley raboty skvazhiny posle primeneniya geologo-tekhnicheskikh meropriyatiy [Development of a methodology for predicting the technological indicators of well operation after the application of geological and technical measures]. *Neftepromyslovoe delo*, 2020, no. 7 (619), pp. 18–28.

18. Koltyrin A.N. Razrabotka metodiki i otsenka effektivnosti rabotosposobnosti veroyatnostno-statisticheskikh modeley dlya prognozirovaniya prirosta debita nefi v skvazhinakh posle provedeniya gidrorazryva plasta [Development of a methodology and evaluation of the performance efficiency of probabilistic-statistical models for predicting the increase in oil production in wells after hydraulic fracturing]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2022, no. 4 (364), pp. 49–58.
19. Farkhutdinova M.Kh. Analiz vliyaniya geologotekhnologicheskikh parametrov skvazhin i protsessa gidravlicheskogo razryva plasta na ego effektivnost [Analysis of the influence of geological and technological parameters of wells and the process of hydraulic fracturing on its efficiency]. *Elektronny nauchny zhurnal Neftgazovoe delo*, 2014, no. 3, pp. 33–48. Available at: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3\\_2014/ogbus\\_3\\_2014\\_p33-48\\_FarkhutdinovaMKh\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2014/ogbus_3_2014_p33-48_FarkhutdinovaMKh_ru.pdf) (accessed 15 January 2023).
20. Diyeng Assan, Khizhniak G.P. Prognoz effektivnosti gidravlicheskogo razryva plasta po geologicheskim pokazatelyam [Forecast of the effectiveness of hydraulic fracturing based on geological indicators]. *Neftpromyslovoe delo*, 2023, vol. 649, no. 1, pp. 25–28.
21. Dieng A., Khizhniak G.P. Analysis of the efficiency of hydraulic fracturing on the example of the oil field in the Perm region. *Innovatsionnye issledovaniya: opyt, problemy vnedreniya rezultatov i puti resheniya. Sbornik statey Natsionalnoy (Vserossiyskoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Innovative research: experience, problems of implementation of results and solutions. Collection of articles of the National (All-Russian) scientific and practical conference with international participation]. Kirov, 22 October 2022. Ufa, OMEGA SCIENCE, 2022. pp. 240–244.
22. Dieng A., Khizhniak G.P. Ispolzovanie geologicheskikh parametrov produktivnykh odozheniy dlya prognoza effektivnosti gidrorazryva [Using the geological parameters of productive deposits to predict the effectiveness of hydraulic fracturing]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopayemykh. Materialy XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii* [Problems of development of deposits of hydrocarbon and ore minerals. Materials of the XV International scientific and technical conference]. Perm, Yekaterinburg, October 18–21, 2022. pp. 207–212.

Received: 31 January 2023.

Reviewed: 7 March 2023.

#### Information about the authors

**Grigoriy P. Khizhniak**, Dr. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.  
**Assane Dieng**, postgraduate student, assistant, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 66.074

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Лиинтин Илья Алексеевич<sup>1</sup>,  
quw\_06@mail.ru

Ерофеев Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
erofeevvi@mail.ru

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

**Актуальность.** В последние годы большая часть имеющихся нефтяных и газовых месторождений в Российской Федерации находятся на последней стадии разработки. Для таких месторождений характерны низкие устьевые давления, увеличение обводненности продукции, а также большое количество механических примесей. Данные факторы пагубно влияют на технико-экономические показатели работы установок подготовки газа, а также на дальнейший транспорт газа по магистральным газопроводам. Вследствие этого возникает острая необходимость в создании новых эффективных технологий в подготовке природных и нефтяных попутных газов. Помимо создания новых технологий, можно модернизировать имеющиеся установки по подготовке скважинной продукции или повышать эффективность технологических параметров процессов очистки углеводородного сырья от воды и вредных примесей.

**Цель:** модернизировать текущую технологическую схему установки подготовки природного газа.

**Объект:** установка комплексной подготовки газа.

**Метод:** технологическое моделирование процесса подготовки природного газа в программном комплексе «UniSim Design».

**Результаты.** Рассчитано и показано, какое количество ингибитора гидратообразования необходимо подавать в газопровод-шлейф при транспортировании с куста газовых скважин до установки комплексной подготовки газа. Рассчитаны температуры точки росы до модернизации входного сепаратора и после, а также процентное содержание влаги в природном газе до модернизации и после модернизации установки подготовки газа. Если устьевые и пластовые давления будут сильно падать, необходимо проводить общую реконструкцию промыслов, сборных сетей, возможно объединение промыслов, установка модульных компрессорных станций, поскольку давления и количества газа для дожимных компрессорных станций будет недостаточно. В связи с этим сверхзвуковая сепарация является наиболее перспективным методом разделения и очистки газоконденсатных смесей от влаги и кислых газов. После замены сепаратора на 3S-сепаратор в установке комплексной очистки природного газа понизилась температура точки росы товарного газа. Давление газа на выходе 3S-сепаратора имеет значения, соответствующие технологическому режиму эксплуатации абсорбера, и количество отделенной влаги и жидкости в процентном соотношении станет больше.

### Ключевые слова:

абсорбционная осушка газа, температура точки росы, установка комплексной подготовки газа, природный газ, дожимная компрессорная станция, 3S-сепаратор.

### Введение

Скважинная продукция, добываемая из газоносных залежей, представляет собой сложную смесь насыщенных парами влаги углеводородных газов, капельной воды и твердых частиц, поэтому процесс очистки газожидкостной смеси является обязательным и очень важным в любом технологическом процессе промышленной подготовки природного газа к дальнейшему транспорту.

Все это в сочетании с рядом других технологических и конструктивных факторов не может не оказывать негативного влияния на работу установки подготовки газа в целом и на работу отдельных аппаратов. Поэтому необходимо модернизировать, заменять и вводить новое оборудование, чтобы процесс подготовки газа проходил эффективно и товарный продукт соответствовал требованиям отраслевого стандарта.

В настоящее время ряд месторождений Крайнего Севера находится на стадии падающей добычи. В связи с истощением залежей промыслы сталкиваются с такой проблемой, как низкое пластовое давление, следствием чего являются обводненный фонд скважин, увеличение выноса механических примесей и содержащихся в воде солей, высокая температура га-

за после его компримирования, избыточное содержание влаги и наличие частиц компрессорного масла в товарном газе. Кроме того, при низком пластовом давлении газа в залежи на промыслах необходимо строительство дополнительных мощностей дожимных компрессорных станций. Газоперекачивающие агрегаты повышают температуру газа, особенно в летний период, в результате чего получается «перегретый» газ, процесс подготовки которого является более трудным [1].

Перечисленные факторы негативно влияют на процесс осушки и качество товарного газа. Основным технологическим параметром товарного газа – температура точки росы (ТТР) газа по влаге. Учитывая вышеописанные обстоятельства, можно сделать вывод о том, что сейчас актуален вопрос соответствия ТТР СТО Газпром 089-2010 [2] в сложных условиях эксплуатации, особенно в период летних пиковых температур.

В ходе эксплуатации месторождения изменяются входные давление и температура газа перед установкой комплексной подготовки газа (УКПГ). Это приводит к необходимости изменения технологии процесса осушки [3]. Один из вариантов достижения по-

ставленной цели – модернизация и усовершенствование существующего оборудования или изменение технологического процесса подготовки природного газа.

Достижение поставленной цели возможно различными путями:

- изменение режимных параметров [4];
- модернизация оборудования;
- добавление новых аппаратов в технологическую схему.

#### Методика проведения исследования

Моделирование схем и процессов абсорбционной осушки природного газа от примесей воды проводилось с помощью программного комплекса технологического моделирования «Honeywell UniSim Design», различные графики и зависимости были построены в MS Excel.

#### Транспорт газа

Состав газа, поступающего на УКПГ, представлен в табл. 1 и соответствует реальным данным газоконденсатного месторождения Крайнего Севера. Содержание влаги в сыром газе составляло 2–3 г/м<sup>3</sup>, сероводород отсутствует.

Таблица 1. Исходный состав газа

Table 1. Initial gas composition

Компонент/Component	% объемные/% vol.
CH <sub>4</sub>	97,8
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,15
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,12
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,02
CO <sub>2</sub>	0,27
He	0,02
N <sub>2</sub>	1,62

Как видно из табл. 1, в составе газа преобладает метан (CH<sub>4</sub>), соответственно газ является «тощим», поскольку содержание тяжелых (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) углеводородов по сравнению с содержанием метана мало.

В табл. 2 представлены технологические параметры газа в начальный период эксплуатации и в настоящее время.

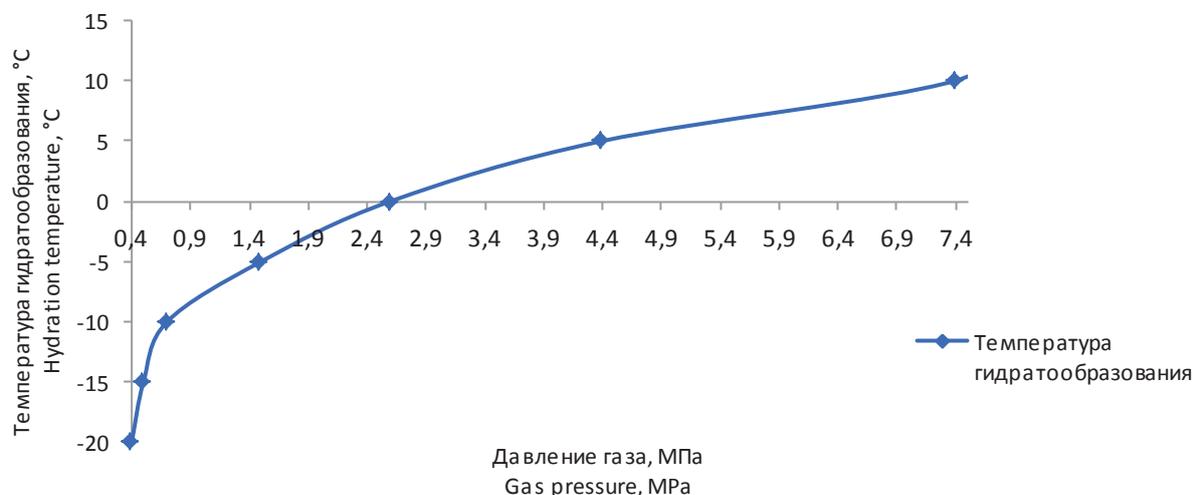


Рис. 1. Зависимость изменения температуры гидратообразования газа

Fig. 1. Dependence of change of gas hydrate formation temperature

Таблица 2. Параметры газа

Table 2. Gas parameters

Параметры газа Gas parameters	Годы/Years			
	2000	2007	2014	2019
Среднее пластовое давление, МПа Average reservoir pressure, MPa	11,7...12,5	6,9...7,8	3,3...4,6	1,7...2,5
Динамическое давление газа на устье, МПа Dynamic gas pressure at the wellhead, MPa	10,3...11,2	6,1...8,1	3,5...4,2	0,9...1,4
Температура газа на устье, °С Wellhead gas temperature, °C	13...14	13...14	10...13	9...13

Как видно из табл. 2, давления снизились значительно, по сравнению с начальным периодом эксплуатации месторождения.

Проблема низких пластовых и устьевых давлений при подготовке газа решается путем введения в технологическую схему дожимных компрессорных станций (ДКС), причем необходимо их ввести перед подключением к УКПГ, таким образом газ будет компримироваться до необходимых рабочих давлений в соответствии с технологическим регламентом [5].

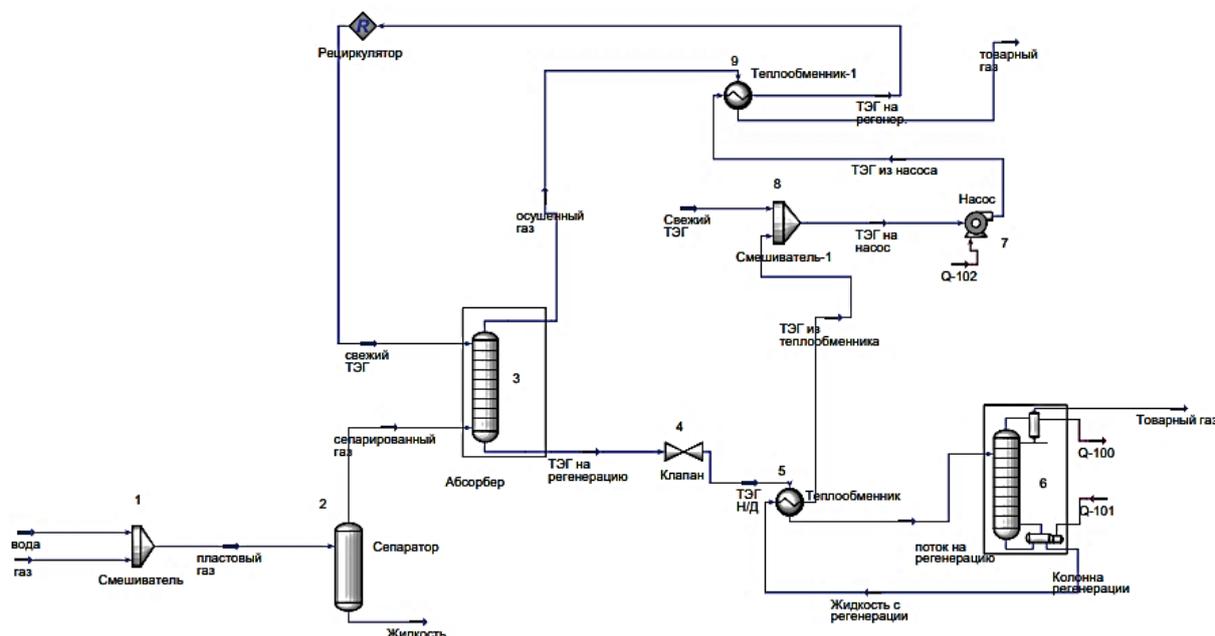
Транспорт сырого газа по трубопроводам-шлейфам от кустов газовых скважин до УКПГ сопровождается потерей давления, появлением конденсационной воды и, как следствие, снижением температуры. При понижении температуры ниже температуры гидратообразования происходит образование кристаллогидратов, в результате снижается производительность скважин и возникает аварийная ситуация. Для предупреждения льдо- и гидратообразования в шлейфы подают метанол [6–8].

С помощью утилиты Hydrate UniSim Design можно подобрать оптимальное количество раствора ингибитора гидратообразования (метанола), а также построить график зависимость температуры гидратообразования газа месторождения от давления (рис. 1).

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что концентрация раствора ингибитора гидратообразования должна быть не менее 95 %, давление газа составлять более 2,5 МПа.

### Модернизация промышленного оборудования

Далее представлена упрощенная технологическая схема подготовки природного газа путем гликолевой абсорбционной осушки.



**Рис. 2.** Принципиальная схема абсорбционной осушки природного газа в программе «Unisim Design»: 1 – миксер для смешивания потоков газа и воды с целью получения сырого газа; 2 – сепаратор; 3 – абсорбер; 4 – регулирующий клапан; 5 – печь для подогрева насыщенного абсорбера ТЭГ; 6 – колонна для регенерации ТЭГ (ректификационная колонна); 7 – насос; 8 – миксер для смешивания регенерированного ТЭГ и ТЭГ с большей концентрацией; 9 – теплообменник

**Fig. 2.** Schematic diagram of absorption dehydration of natural gas in the «Unisim Design»: 1 – mixer for mixing gas and water flows in order to obtain raw gas; 2 – separator; 3 – absorber; 4 – control valve; 5 – furnace for heating saturated absorber TEG; 6 – column for TEG regeneration (rectification column); 7 – pump; 8 – mixer for mixing regenerated TEG and TEG with a higher concentration; 9 – heat exchanger

В табл. 3 представлены базовые параметры согласно технологическому регламенту.

**Таблица 3.** Базовые параметры для моделирования

**Table 3.** Basic parameters for simulation

Концентрация гликолей, % мас. Concentration of glycols, wt. %	Температура контакта газ–гликоль, °С Gas-glycol contact temperature, °С	Давление осушаемого газа перед абсорбером, МПа Drying gas pressure before the absorber, MPa	Давление в абсорбере, МПа Pressure in absorber, MPa	Расход гликоля, м <sup>3</sup> /ч Glycol flow, m <sup>3</sup> /h	Расход осушаемого газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч Dried gas flow, thous. m <sup>3</sup> /h
99	18	4	6	3	300

Поскольку при данных параметрах (давление и температура) подготовленный осушенный товарный газ не достигает по температуре точки росы по влаге до СТО Газпром 089-2010, что подтверждается данными, полученными при моделировании, которые приведены в табл. 4, необходимо найти решение данной проблемы. В работах [9, 10] рассматриваются различные варианты подготовки товарного сырья вследствие снижения пластового и устьевых давле-

ний. В работах предлагаются и реконструкция, и модернизация оборудования и установок подготовки газа. В каждой статье проведено исследование того, как влияет то или иное мероприятие на конечный товарный продукт. Например, в работе [11] предлагается реконструировать абсорбер, то есть заменить тарелки в массообменной секции, которые отвечают за взаимодействие с абсорбентом газа, где и происходит осушка. Также приведены данные, которые подтверждают эффективность данной модернизации.

**Таблица 4.** Данные, полученные при моделировании

**Table 4.** Simulation data

Температура точки росы Dew point, °С		Процентное соотношение удаляемой влаги, % Percentage of moisture removed, %
Зима/Winter	Лето/Summer	
-17,9	-8,7	86,8

Как было описано выше, для компримирования газа вводятся ДКС, после которых газовая смесь имеет достаточное давление для дальнейшей осушки согласно технологическому регламенту. После ДКС газ необходимо охладить, этот фактор можно отнести к недостаткам.

При низких устьевых параметрах сырой газожи-  
 дкостной смеси встает вопрос о модернизации или за-  
 мене входных сепараторов.

Сепаратор представляет собой вертикальный ци-  
 линдрический аппарат с внутренним диаметром 2600  
 мм с узлом предварительной очистки газа (у штуцера  
 входа) и тремя секциями [12]:

- входной с сепарационными элементами типа ГП 353;
- выходной сепарационной с элементами типа ГПР 515;
- секцией промывки, состоящей из двух массооб-  
 менных тарелок с центробежными элементами  
 типа ГПР 340.

Эскиз сепаратора представлен на рис. 3.

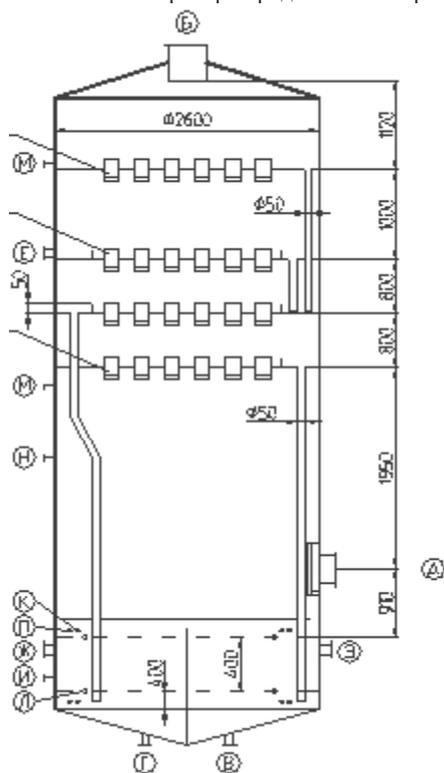


Рис. 3. Эскиз сепаратора с промывочной секцией  
 Fig. 3. Sketch of a separator with a flushing section

В данной работе предлагается в цеху очистки газа  
 произвести замену входных сепараторов ГП 1300.01  
 на сверхзвуковой сепаратор (3S-сепаратор) [13].

В последние годы на объектах подготовки при-  
 родного газа к транспорту интенсивно используются  
 сверхзвуковые технологии обработки природных га-  
 зов, наиболее известной из которых является 3S-  
 технология. В ее основе лежит принцип охлаждения  
 смеси газов при адиабатическом расширении закру-  
 ченного потока газа в сверхзвуковом сопле. Закрутка  
 потока осуществляется с помощью завихрителя тан-  
 генциального или лопаточного типа, устанавливаемо-  
 го в форкамере сопла. В сверхзвуковом потоке тем-  
 пература газа значительно ниже температуры газа на  
 входе в сопло из-за перераспределения кинетической  
 и потенциальной энергии потока (кинетическая энер-  
 гия потока возрастает, соответственно, падает потен-  
 циальная энергия, линейно зависящая от температуры  
 газа). За счет того, что скорость потока в сверхзвуко-  
 вом сопле составляет 600–800 м/с даже при неболь-  
 ших числах Маха, температура газа в сверхзвуковом  
 потоке достигает 60–100 °С даже при положительной  
 температуре газа на входе в сопло. При такой низкой  
 температуре происходит конденсация не только ком-  
 понентов тяжелее этана (пропана, бутана, пентана и т.  
 д.), но и части метана с этаном. Поэтому такой способ  
 охлаждения позволяет обеспечивать высокие степени  
 извлечения различных компонентов природного газа.  
 Образовавшиеся капли сконденсировавшихся фрак-  
 ций углеводородов сепарируются к стенкам сопла за  
 счет их движения в поле центробежных сил закру-  
 ченного потока. Отбор двухфазного потока со стенок  
 осуществляется в специальной разделительной сек-  
 ции, размещенной на выходе из сопла. На выходе из  
 этой секции устанавливаются диффузоры, в которых  
 за счет расширения геометрии канала происходит  
 торможение потока, и соответственно, возрастает  
 температура газа. Диффузоры устанавливаются как в  
 потоке очищенного газа, так и в двухфазном потоке,  
 содержащем извлеченные компоненты. Схематически  
 устройство для реализации описанного способа  
 сверхзвуковой сепарации (3S-сепаратор) показано на  
 рис. 4.

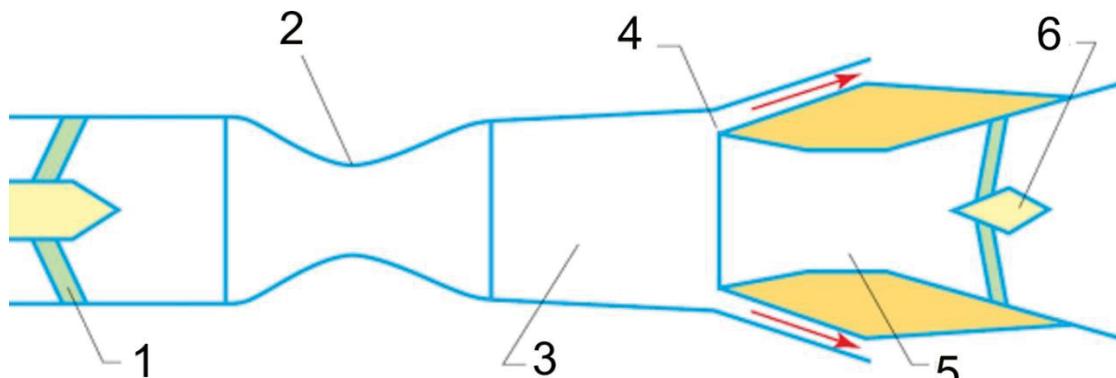


Рис. 4. Принципиальная схема 3S-сепаратора: 1 – завихряющее устройство; 2 – сопло Лавалья; 3 – рабочая секция;  
 4 – двухфазный сепаратор газ–жидкость; 5 – диффузор; 6 – направляющий аппарат  
 Fig. 4. 3S-separator basic circuit diagram: 1 – swirling device; 2 – Laval nozzle; 3 – working section;  
 4 – two-phase gas–liquid separator; 5 – diffuser; 6 – guide apparatus

В настоящее время установки 3S-сепарации эксплуатируются на УКПГ ОАО «РН-Пурнефтегаз», а также на УКПГ УАНА и TLMDB месторождения Tarim компании PetroChina (Китай) [14, 15]. Все эти установки предназначены для подготовки газа к транспорту и обеспечения необходимых точек росы по воде и углеводородам в товарном газе.

Результаты промышленного использования выявили такие эксплуатационные особенности 3S-сепараторов, как:

- надежность, обусловленная отсутствием движущихся или вращающихся элементов в конструкции;
- простота монтажа и эксплуатации;
- низкие капитальные и эксплуатационные затраты;
- более широкие по сравнению с турбодетандерами диапазоны рабочих параметров (изменения расходов, давлений, составов и т. п.);
- возможность работы при наличии жидкости во входном потоке газа (что абсолютно неприемлемо для турбодетандеров);
- возможность установки вне обогреваемых помещений (особенно важно в арктических районах);
- 3S-сепарация может также применяться и для очистки природных газов от кислых компонентов, таких как сероводород и углекислый газ [16–18].

Изучению технологии сверхзвуковой сепарации посвящено множество научных работ как российских, так и зарубежных авторов. Так, в работе [19] изучена эффективность сепарации в сверхзвуковом сепараторе и рассмотрен двухфазный поток «газ–жидкость» без учета фазового перехода и процесса каплеобразования (размер капель принимается постоянным). Результаты сравнений математического моделирования и эксперимента говорят о точном теоретическом описании процесса (погрешность не превышает 6 %). В ходе экспериментов было показано, что чем больше перепад давления, тем выше скорость закрутки и больше эффективность сепарации. В работе [20] представлено сравнение научно-технических разработок по повышению эффективности процессов газоочистки (насадочного сепаратора, комбинированных сепараторов, фильтров и сверхзвукового низкотемпературного сепаратора). В работе приводятся основные параметры природного газа при прохождении через сверхзвуковые сепараторы в установке низкотемпературной сепарации. Авторы констатируют, что сверхзвуковая сепарация является наиболее перспективным методом разделения газоконденсатных смесей.

После замены сепаратора на 3S-сепаратор получили следующие данные, представленные в табл. 5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дробин Я.К. Модернизация системы подготовки природного газа на месторождениях с падающей добычей на примере западно-тарко-салинского газового промысла // Газовая промышленность. – 2018. – № 10. – С. 48–52.
2. СТО Газпром 089-2010 «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия». – М.: ОАО «Газпром», 2010. – 19 с.

Таблица 5. Параметры после моделирования

Table 5. Parameters after simulation

Температура точки росы Dew point, °C		Давление осушаемого газа перед абсорбером, МПа Drying gas pressure before the absorber, MPa	Давление в абсорбере, МПа Pressure in the absorber, MPa	Процентное соотношение удаляемой влаги, % Percentage of moisture removed, %
Зима Winter	Лето Summer			
–24,9	–13,6	5,9...6,1	6	95

Как видно из табл. 5, температура точки росы товарного газа снизилась, что соответствует отраслевому стандарту. Также можно видеть, что давление газа на выходе сепаратора имеет значения, которые соответствуют технологическому режиму эксплуатации абсорбера. Количество отделенной влаги и жидкости в процентном соотношении стало больше.

#### Заключение

На основе полученных результатов моделирования технологического процесса абсорбционной осушки природного газа в среде программного комплекса Unisim Design установлено, что замена сепаратора ГП 1300.01 на 3S-сепаратор положительно сказалась на конечном товарном продукте, который, в свою очередь, должен соответствовать определенным данным отраслевого стандарта.

Также показано, что 3S-сепараторы довольно широко распространены в зарубежной и отечественной практике для переработки, подготовки и очистки нефтей, газовых конденсатов, попутных нефтяных и природных газов от воды и кислых газов.

В будущем, если устьевые и пластовые давления будут сильно падать, рекомендуется производить общую реконструкцию промыслов, сборных сетей, возможно объединение промыслов, установка модульных компрессорных станций, поскольку давления и количества газа для дожимных компрессорных станций будет недостаточно.

В связи с этим сверхзвуковая сепарация является наиболее перспективным методом разделения и очистки газоконденсатных смесей от влаги и кислых газов. После замены сепаратора на 3S-сепаратор в установке комплексной очистки природного газа понизилась температура точки росы товарного газа, давление газа на выходе сепаратора имеет значения, соответствующие технологическому режиму эксплуатации абсорбера, и количество отделенной влаги и жидкости в процентном соотношении станет больше.

*Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования Томского политехнического университета «Физико-химические методы анализа».*

3. Лиинтин И.А., Ерофеев В.И., Джалилова С.Н. Особенности промышленной подготовки природного газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 96–102.
4. Лиинтин И.А., Ерофеев В.И. Влияние термобарических параметров на эффективность процесса подготовки природного газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 32–36.

5. Создание инновационных систем управления, направленных на повышение эффективности работы оборудования дожимных компрессорных станций / С.Н. Меньшиков, И.В. Мельников, Н.М. Бобриков, В.Е. Столяров, А.А. Когай, Д.П. Щеголев // Газовая промышленность. – 2019. – Т. 781. – № 3. – С. 18–22.
6. Carroll J. Natural gas hydrates: a guide for engineer. – United Kingdom: Gulf Professional Publ., 2020. – 340 p.
7. Natural gas dehydration by desiccant materials / A.A. Farag Hassan, M.M. Ezzat, H. Amer, A.W. Nashed // Alexandria Engineering Journal. – 2011. – V. 50. – P. 431–439.
8. Mohammad B., Tehrani D.M. Effect of magnetic field on gas hydrate formation // Natural Gas Industry B. – 2022. – V. 9. – P. 240–245.
9. Sheng Chong D.J., Foo D.C.Y., Putra Z.A. A reduced order model for triethylene glycol natural gas dehydration system // South African Journal of Chemical Engineering. – 2023. – V. 44. – P. 51–67.
10. He X., Kumakiri I., Hillestad M. Conceptual process design and simulation of membrane systems for integrated natural gas dehydration and sweetening // Separation and Purification Technology. – 2020. – V. 247. – P. 23–33.
11. Khan M., Atiquezzaman M., Maruf A. Optimizing effective absorption during wet natural gas dehydration by triethylene glycol // Journal of Applied Chemistry. – 2016. – V. 2. – P. 01–06.
12. Stewart M. I., Arnold K. Surface production operations. V. 2: Design of Gas-Handling Systems and Facilities. – United Kingdom: Gulf Professional Publ., 2020. – 540 p.
13. Китов Е.С., Ерофеев В.И., Джалилова С.Н. Анализ технологий промышленной подготовки природного газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 31–38.
14. Study on the influence of wall-mounted cyclone on the purification and separation performance of supersonic separator / J. Chen, W. Jiang, X. Lai, X. Cao, J. Bia // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2020. – V. 150. – P. 223–226.
15. Alfyorov V., Bagirov L., Dmitriev L. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas component // Oil & Gas Journal. – 2005. – V. 103. – № 20. – P. 53–58.
16. Rajaei Shooshtari S.H., Shahsavand A. Optimal operation of refrigeration oriented supersonic separators for natural gas dehydration via heterogeneous condensation // Applied Thermal Engineering. – 2018. – V. 139. – P. 76–86.
17. Interlenghi S.F., Medeiros J.L., Queiroz O. On the sustainability of small-scale expansion-based natural gas liquefaction: Supersonic separator, Joule-Thomson, and turbo-expander // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2021. – V. 95. – P. 70–76.
18. Majidi D., Farhadi F. Supersonic separator's dehumidification performance with specific structure: Experimental and numerical investigation // Applied Thermal Engineering. – 2020. – V. 179. – P. 115–120.
19. Xingwei L., Zhongliang L., Yanxia L. Investigation on separation efficiency in supersonic separator with gas-droplet flow based on DPM approach // Separation Science and Technology. – 2014. – V. 49. – P. 2603–2612.
20. Фарахов Т.М., Исхаков А.Р., Минигулов Р.М. Высокоэффективное сепарационное оборудование очистки природного газа от дисперсной среды // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 6. – С. 263–277.

Поступила: 26.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 14.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Лиинтин И.А.**, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ерофеев В.И.**, профессор, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 66.074

## MODERNIZATION OF NATURAL GAS TREATMENT

Iliia A. Liintin<sup>1</sup>,  
quw\_06@mail.ru

Vladimir I. Erofeev<sup>1</sup>,  
erofeevvi@mail.ru

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

**The relevance.** Most of the existing fields in the Russian Federation are at the last stage of development. They are characterized by low wellhead pressures, increase in water cut, as well as a large amount of mechanical impurities. These factors have a detrimental effect on the technical and economic performance of the installations, as well as on the further transport of gas through the main gas pipelines. As a result, there is an urgent need to create new efficient technologies in the preparation of natural and associated petroleum gases. In addition to create new technologies, it is possible to upgrade the existing well production facilities or change process parameters.

**The main aim:** to modernize the current technological scheme of natural gas treatment.

**Object:** complex gas treatment plants of gas fields.

**Method:** modeling with a software package «UniSim Design».

**Results.** It was calculated and shown how much of the hydrate formation inhibitor must be supplied to the gas pipeline during transportation from a cluster of gas wells to a complex gas treatment unit. The dew point temperatures were calculated before and after the upgrade of the inlet separator, as well as the percentage of moisture in natural gas before and after the upgrade of the gas treatment unit. If the wellhead and reservoir pressures drop significantly, it is necessary to carry out a general reconstruction of fields, prefabricated networks, it is possible to combine fields, install modular compressor stations, since the pressure and amount of gas for booster compressor stations will not be enough. In this regard, supersonic separation is the most promising method for separating and purifying gas condensate mixtures from moisture and acid gases. After replacing the separator with a 3S-separator in the complex natural gas purification unit, the dew point temperature of the commercial gas decreased. Gas pressure at the outlet of the 3S-separator has values corresponding to the process mode of absorber operation and the amount of separated moisture and liquid, in percentage terms, will increase.

**Key words:**

absorption gas dehydration, dew point temperature, complex gas treatment plant, natural gas, boosting compressor station, 3S-separator.

The authors are grateful to the TPU center «Physical and chemical methods of analysis».

## REFERENCES

1. Drobin Y.K. Improvement of the natural gas purification system at fields with declining production on the example of the Zapadno-Tarkosalinsky gas field. *Gas Industry = Gazovaya promyshlennost*, 2018, vol. 775, no. 10, pp. 48–52. In Rus.
2. *STO Gazprom 089-2010. Gaz goryuchiyy prirodny, postavlyaemy i transportiruemy po magistralnym gazoprovodam. Tekhnicheskie usloviya* [Natural gas, supplied and transported through main gas pipelines. Technical conditions]. Moscow, OAO Gazprom Publ., 2010. 15 p.
3. Liintin I.A., Erofeev V.I., Dzhililova S.N. Features of commercial treatment of natural gas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 96–102. In Rus.
4. Liintin I.A., Erofeev V.I. Influence of temperature and pressure conditions on the efficiency of natural gas preparation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 32–36. In Rus.
5. Menshikov S.N., Melnikov I.V., Bobrikov N.M. Setting up innovative management system aimed at improving the performance of booster compressor stations. *Gas Industry = Gazovaya promyshlennost*, 2019, vol. 781, no. 3, pp. 18–19. In Rus.
6. Carroll J. *Natural gas hydrates: a guide for engineer*. Burlington, Gulf Professional Pub., 2020. 400 p.
7. Farag Hassan A.A., Ezzat M.M., Amer H. Natural gas dehydration by desiccant materials. *Alexandria Engineering Journal*, 2011, vol. 50, pp. 431–439.
8. Mohammad B., Tehrani D.M. Effect of magnetic field on gas hydrate formation. *Natural Gas Industry B*, 2022, vol. 9, pp. 240–245.
9. Sheng Chong D.J., Foo D.C.Y., Putra Z.A. A reduced order model for triethylene glycol natural gas dehydration system. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2023, vol. 44, pp. 51–67.
10. He X., Kumakiri I., Hillestad M. Conceptual process design and simulation of membrane systems for integrated natural gas dehydration and sweetening. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 247, pp. 23–33.
11. Khan M., Atiquezzaman M., Maruf A. Optimizing effective absorption during wet natural gas dehydration by triethylene glycol. *Journal of Applied Chemistry*, 2016, vol. 2, pp. 01–06.
12. Stewart M.I., Arnold K. *Surface production operations. Vol. 2: Design of Gas-Handling Systems and Facilities*. United Kingdom, Gulf Professional Pub., 2020. 540 p.
13. Kitov E.S., Erofeev V.I., Dzhililova S.N. Analysis of technologies of natural gas field preparation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 31–38. In Rus.
14. Chen J., Jiang W., Lai X. Study on the influence of wall-mounted cyclone on the purification and separation performance of supersonic separator. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2020, vol. 150, pp. 223–226.
15. Alfyorov V., Bagirov L., Dmitriev L. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas component. *Oil & Gas Journal*, 2005, vol. 103, no. 20, pp. 53–58.
16. Rajae Shoohtari S.H., Shahsavand A. Optimal operation of refrigeration oriented supersonic separators for natural gas dehydration via heterogeneous condensation. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 139, pp. 76–86.
17. Interlenghi S.F., Medeiros J.L., Queiroz O. On the sustainability of small-scale expansion-based natural gas liquefaction: supersonic separator, Joule-Thomson, and turbo-expander. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, vol. 95, pp. 70–76.
18. Majidi D., Farhadi F. Supersonic separator's dehumidification performance with specific structure: Experimental and numerical investigation. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 179, pp. 115–120.

19. Xingwei L., Zhongliang L., L. Yanxia L. Investigation on separation efficiency in supersonic separator with gas-droplet flow based on DPM approach. *Separation Science and Technology*, 2014, vol. 49, pp. 2603–2612.
20. Farakhov T.M., Iskhakov A.R., Minigulov R.M. Highly efficient separation equipment for natural gas purification from the dispersion media. *Neftegazovoe delo = Oil and gas business*, 2011, no. 6, pp. 263–277. In Rus.

*Received: 26 February 2023.*

*Reviewed: 14 March 2023.*

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

*Iliia A. Liintin*, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Vladimir I. Erofeev*, Dr. Sc., professor, academician of RANS, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.9:538.9

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Минакова Наталья Николаевна<sup>1</sup>,  
minakova@asu.ru

Ушаков Василий Яковлевич<sup>2</sup>,  
vyush@tpu.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет,  
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

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

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью дальнейшего улучшения свойств композиционных материалов – их технологичности и экологичности, ресурсной и энергетической эффективности. Сфера применения таких материалов расширяется, охватывая, в том числе, разведку и добычу нефтегазовых ресурсов, благодаря возможности регулирования их свойств в широких пределах. Резистивные и изоляционные изделия из полимерных материалов с углеродными компонентами характеризуются небольшим весом и стоимостью, а также доступностью исходного сырья и промышленной технологией изготовления. Многообразие процессов в наполненных полимерах, применяемых в резистивных конструкциях при повышенных температурах, требует изучения их теплофизических характеристик, определяющих процессы теплообмена и теплопередачи в материале. Тепловыделение и теплообмен в них реализуются на различных уровнях: полимерное связующее, свойства которого формируются под действием углеродного компонента, и электропроводящая сетка, погруженная в полимерную матрицу. Это делает актуальными исследования теплофизических характеристик, которые формируются за счет широкого набора параметров.

**Цель:** изучить теплофизические характеристики наполненных техническим углеродом каучуков для повышения эффективности их использования в изделиях и конструкциях; выявить влияние на теплофизические и структурные характеристики полимерных композиционных материалов углеродных компонентов.

**Методы:** инструментальные измерения теплофизических характеристик материалов, рентгеноструктурный, статистический и корреляционный анализы.

**Результаты.** Экспериментально подтверждено, что теплофизические характеристики (теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность) зависят от вида связующей основы. Проанализирована их связь с физическими свойствами связующей основы и композиционного материала. Установлена зависимость теплофизических характеристик от степени кристалличности связующего компонента в композиционном материале – при увеличении содержания кристаллической фазы в полимере теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность увеличиваются. Сформулированы рекомендации по подбору материала связующего для полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами с учетом характера теплового режима конструкции, например, при работе в нестационарных тепловых режимах.

### Ключевые слова:

Ресурсосбережение, полимерные композиционные материалы с углеродными компонентами, наполненные техническим углеродом эластомеры, метод лазерной вспышки, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности, теплообмен, теплопередача, кристаллическая фаза.

### Введение

Композиционные материалы на основе эластомеров благодаря ряду привлекательных свойств (дешевизна сырья, хорошо освоенная технология, возможность изменять свойства в широких пределах в зависимости от назначения) вызывают возрастающий интерес [1–3].

Наполнение эластомеров техническим углеродом в зависимости от его количества в материале может обеспечить электроизоляционные или электропроводящие свойства изделий из них. Эластомеры используются в нефтегазопромысловых отраслях при производстве транспортерных лент, рукавов, уплотнителей [4]. Наполненные техническим углеродом эластомеры (НТУЭ) с резистивными свойствами применяются для защиты от электромагнитных помех, в установках

обезвоживания нефти, шахтных кабелях, датчиках, в качестве элементов катодной защиты трубопроводов и т. д. Они способны рассеивать большие мощности при коротких замыканиях и перенапряжениях в электрических сетях, решать задачу эффективной надежной работы ответственных потребителей, например, электродвигателей насосов и компрессоров.

Для широкомасштабного использования НТУЭ необходимо знание комплекса характеристик и особенностей их формирования. Улучшение их потребительских свойств требует изучения электрофизических, теплофизических, механических характеристик [5–8].

Для НТУЭ с углеродными компонентами детально изучались электрофизические характеристики [2, 9]. Однако полимерные материалы применяются

для регулирования удельной тепловой мощности блоков и узлов конструкций в машиностроении, электротехнических устройствах, перераспределения тепловой энергии в узлах электрической сети и т. д. О теплофизических характеристиках сведений существенно меньше, хотя они перспективны для создания защиты наиболее сложного и дорогостоящего оборудования, в том числе высоковольтных объемных резисторов, способных рассеивать огромные мощности и т. д. Проблема перераспределения и отвода тепловой энергии, управления тепловыми полями, которые из-за конструкционной гибкости материала могут быть различных сложных форм, требует понимания закономерностей изменений теплофизических свойств, которые определяются особенностями структуры. Структура таких материалов многокомпонентная, поэтому в формировании конечных характеристик участвует множество факторов [10–12]. На характеристики влияет вид полимера, марка и концентрация электропроводящего наполнителя.

На данном этапе изучалась возможность рассеивания тепла в зависимости от вида полимера. Решались следующие задачи:

- измерить теплофизические характеристики выбранных объектов исследования;
- сопоставить теплофизические характеристики материалов с физическими свойствами связующих компонентов;
- сопоставить теплофизические характеристики материалов с физическими характеристиками, зависящими от структуры композиционного материала.

#### Объекты и методы исследования

По названным выше причинам в качестве объекта исследования выбраны НТУЭ.

Исследован комплекс их теплофизических характеристик: теплоёмкость, теплопроводность, температуропроводность при повышенных температурах и многократных изменениях температурного режима [13–15]. Указанные параметры выбраны по следующим причинам. Скорость поступления тепла в материал и выхода из него зависит от теплопроводности. Теплопроводность позволяет оценить теплоизоляционные свойства материала. Скорость подъема температуры в материале после поступления в него тепла зависит от теплоемкости. Температуропроводность, отражающая скорость распространения тепловой энергии по объему материала, важна для конструкций, работающих в нестационарном режиме [15].

Для оценки влияния связующей основы на теплофизические свойства проанализированы материалы одинаковой технологии изготовления и вида наполнителя. Эксперименты выполнялись с материалами, имеющими в качестве связующей основы кристаллический каучук (Butil Rubber, IIR по ASTM) в РФ БК-2055 и аморфный бутадиен-метилстирольный каучук Styrene Butadiene Rubber (SBR по ASTM) в РФ СКМС-30АРК. Электропроводящий наполнитель – технический углерод П-234. Он выбран вследствие того, что производится в промышленных масштабах, хорошо зарекомендовал себя при формировании

электрофизических характеристик [2, 16]. Исследованы материалы с концентрацией технического углерода 80 массовых частей на 100 массовых частей каучука.

Испытания теплофизических характеристик производились методом лазерной вспышки на установке DLF-1200. Преимуществом этого метода является высокая скорость измерения с хорошей точностью и воспроизводимостью [17–19]. Эксперимент заключался в воздействии импульсом на лицевую часть образца. Результаты записывались в виде температурной кривой. Для оптимизации поглощения импульса образцы покрывались тонким слоем графита (графитовый спрей). Для измерения теплопроводности регистрировалась разница между начальной и конечной температурами тыльной стороны образца. Значение теплопроводности определялось как отношение величин теплового потока к температурному градиенту.

В программную часть прибора вводились масса, диаметр, высота и плотность материала образца. Задавались значения температур, при которых производилась лазерная вспышка. Использованы шесть точек сегмента (первый сегмент пробный). В дальнейшем для определения теплофизических характеристик его данные не участвовали. Среднее значение посчитано прибором по всем «выстрелам» лазера по образцу (пять величин). Исследования выполнены в области температур 30–70 °С. Полученные результаты представлены на рис. 1–3.

#### Результаты исследования

Экспериментальные данные представлены на рис. 1–3.

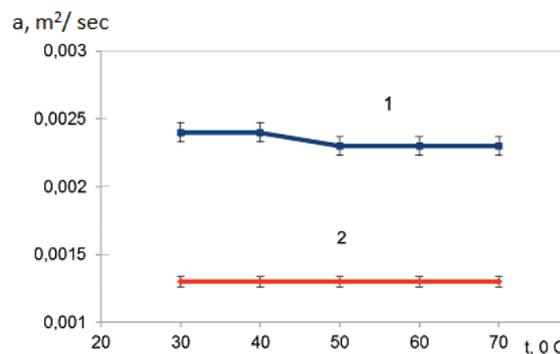


Рис. 1. Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры: связующее 1 – БК-2055, 2 – СКМС-30АРК

Fig. 1. Dependence of thermal diffusivity on temperature: binder 1 – BK-2055, 2 – SKMS-30ARK

Полученные результаты показали следующее:

- в выбранном интервале температур их влияние на исследуемые теплофизические параметры незначительно;
- коэффициент теплопроводности в рассматриваемом диапазоне температур практически не изменяется;
- между коэффициентами теплопроводности и температуропроводности материалов имеет место прямая пропорциональная зависимость, однако диапазон изменения различен;

- значения удельной теплоемкости, коэффициентов теплоемкости и температуропроводности зависят от материала связующей основы;
- вид полимера больше влияет на температуропроводность и теплопроводность, чем на теплоемкость;
- полимерные композиционные материалы с углеродными компонентами со связующим кристаллического строения имеет лучшие теплофизические характеристики по сравнению со связующим аморфного строения.

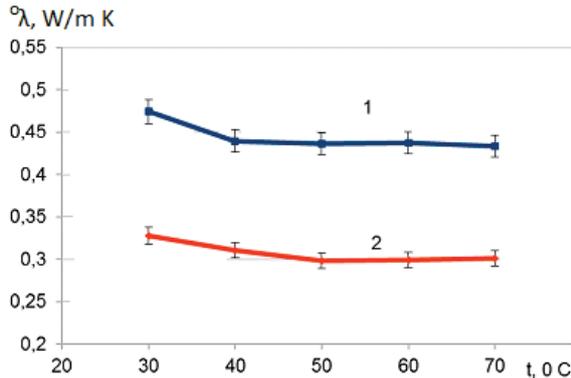


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры: связующее 1 – BK-2055, 2 – СКМС-30АРК

Fig. 2. Dependence of thermal conductivity coefficient on temperature: binder 1 – BK-2055, 2 – SKMS-30ARK

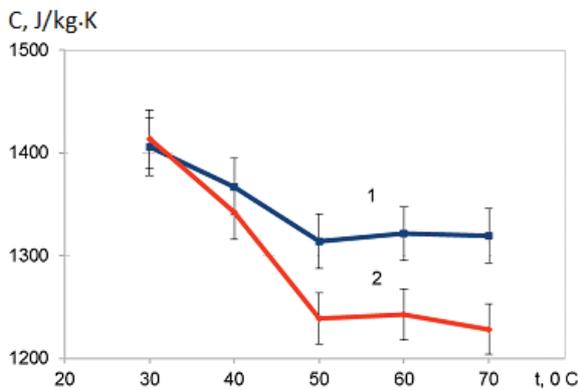


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости от температуры: связующее 1 – BK-2055, 2 – СКМС-30АРК

Fig. 3. Dependence of specific heat capacity on temperature: binder 1 – BK-2055, 2 – SKMS-30ARK

Выявленные закономерности по теплофизическим характеристикам сопоставлялись с физическими характеристиками связующей основы и самого материала.

Структурные характеристики полимеров, влияющие на процессы нагрева, известны: молекулярный вес, конформационный набор макромолекул у твердой поверхности, молекулярная подвижность, меняющаяся из-за адсорбционного взаимодействия с частицами электропроводящего компонента, и т. д. [20, 21]. Проанализированы характеристики, связанные с этими процессами (табл. 1).

Таблица 1. Свойства исследуемых каучуков [22, 23]

Table 1. Properties of the studied rubbers [22, 23]

Связующая основа Bonding base	$d$ , кг/м <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	$t$ , °C	$C_{уд}$ , кДж/(кг·K) $C_{sp}$ , kJ/(kg·K)	$M$ , тысяч единиц M, thous. un.
БК-2055 BK-2055	910	120	1,94	35–85
СКМС-30АРК SKMS-30ARK	920	80–100	1,5–1,9	100–150

Сопоставление данных рис. 1–3 и табл. 1 позволяет сделать вывод о том, что плотность материала связующей основы несущественно влияет на исследованные теплофизические характеристики. Разница практически в два раза по молекулярному весу материала связующей основы непропорционально мало изменяет теплофизические характеристики НТУЭ.

Известно, что присутствие электропроводящего наполнителя вносит коррективы в структуру связующей основы материала. Пространственное распределение наполнителя в полимере зависит от кристалличности. Структурная организация кристаллических полимеров – наличие упорядоченных областей, чередующихся с областями беспорядка, а также большие размеры упорядоченных участков по сравнению с аморфными полимерами [20, 24].

Электропроводящий наполнитель меняет молекулярную подвижность полимера из-за взаимодействия с поверхностью частиц наполнителя. Изменение межмолекулярных взаимодействий в системе приводит к изменению плотности упаковки макромолекул. В этой связи сопоставлялись плотности исследуемых НТУЭ с содержанием кристаллической и аморфной фаз. В качестве основного параметра выбрана кристалличность, которая оценивалась методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Shimadzu XRD 7000S (CuKα-излучение, счетчик-монохроматор Shimadzu CM-3121). Значения плотности материалов и содержание кристаллической фазы представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физические свойства объектов исследования

Table 2. Physical properties of the objects of study

Вид каучука Type of rubber	$d$ , кг/м <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Фаза, процент/Phase, percentage	
		Кристаллическая Crystalline	Аморфная Amorphous
БК-2055 BK-2055	1,4065	71,23	28,77
СКМС-30АРК SKMS-30ARK	1,7731	26,04	73,96

Эксперименты показали, что диапазон изменения исследуемых теплофизических характеристик определяется в основном степенью кристалличности. При этом плотность исследуемых материалов изменяется несущественно. Сопоставление данных о степени кристалличности с данными, представленными на рис. 1–3, показало, что при увеличении степени кристалличности связующей основы значения теплофизических характеристик возрастают. Известно, что кристаллический и аморфный полимер закладывают в материале разное количество прослоек между части-

цами электропроводящего компонента, что подтверждается значениями объемного электрического сопротивления [24, 25]. Поэтому можно полагать, что уменьшение количества прослоек между частицами углеродного компонента улучшает теплофизические характеристики вследствие увеличения числа контактов между частицами электропроводящего компонента.

#### Заключение

Полученные результаты показали, что формирование теплофизических характеристик полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами обусловлено процессами изменения структуры полимера за счет взаимодействия с частицами углеродного компонента. Установлено, что теплофизические характеристики зависят от содержания кристаллической фазы в структуре материала. При возрастании количества кристаллической фазы в поли-

мере имеет место увеличение количественных значений теплофизических характеристик.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать использование полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами с учетом теплового режима работы конструкций. Для конструкций, работающих в неравновесных тепловых режимах, целесообразно выбирать материал с кристаллическим каучуком в качестве связующей основы. При необходимости увеличения скорости подъема температуры при нагреве материала, например, для термисторов, необходим связующий компонент с увеличенным содержанием аморфной фазы.

*Авторы благодарны инженеру Инженерной школы энергетики ТПУ Артуру Насырбаеву за помощь в выполнении измерений.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Quijada C. Conductive polymers: materials and applications // *Materials*. – 2020. – V. 13. – № 10. – P. 2344–2348.
2. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Полимеры с углеродными наполнителями для мощных резисторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 74–80.
3. Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites // *Composite Interfaces*. – 2019. – V. 26. – № 8. – P. 729–750.
4. Эластомеры и полимерные композиции для нефтепромышленного оборудования. Проблемы и возможности / И.С. Пятов, С.В. Тихонова, А.И. Салимон, Л.В. Воробьева, В.В. Лунев, Л.Э. Фомичева // ООО «РЕАМ-ПТИ». URL: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2c4dbe88098556f439ac345.pdf> (дата обращения 15.03.2023).
5. Chen J. et al. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications // *Polymer Reviews*. – 2021. – V. 61. – № 1. – P. 157–193.
6. Gao Q., Liu J., Liu X. Electrical conductivity and rheological properties of carbon black based conductive polymer composites prior to and after annealing // *Polymers and Polymer Composites*. – 2021. – V. 29. – № 9. – P. S288–S295.
7. He X., Wang Y. Recent advances in the rational design of thermal conductive polymer composites // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2021. – V. 60. – № 3. – P. 1137–1154.
8. Zhansakova K.S., Russkikh G.S., Eremin E.N. The effect of vulcanization accelerator on the properties of porous rubber // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2021. – V. 14. – № 2. – P. 215–221.
9. Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Stochastic and deterministic modeling of spatially oriented structures in dispersion-filled polymers // *Polymer Science – Series A*. – 1998. – V. 40 (9). – P. 1025–1029.
10. Brunella V. et al. Thermal/electrical properties and texture of carbon black PC polymer composites near the electrical percolation threshold // *Journal of Composites Science*. – 2021. – V. 5. – № 8. – P. 212.
11. Волков Д.П., Егоров А.Г., Мироненко М.Э. Теплофизические свойства полимерных композиционных материалов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 287–293.
12. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик высоко температурных теплоизоляционных материалов / Томак В.И., Бурков Ф.С., Рыцарев А.М., Товстоног В.А. // *Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки*». – 2020. – № 2 (89). – С. 99–116.
13. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики. – М.: Машиностроение, 2004. – 172 с.
14. Крейт О., Блек У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 256 с.
15. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.
16. Bortnikov A.Yu., Minakova N. Structure analysis of electrically conductive polymers filled with agglomerated components // *Russian Physics Journal*. – 2006. – V. 49 (11). – P. 1165–1170.
17. Cowan R. D. Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures // *J. of Appl. Phys.* – 1963. – V. 34. – 926.
18. Cape J.A., Lehman G.W. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity // *J. of Appl. Phys.* – 1963. – V. 34. – 1909.
19. Инструкция по работе с прибором DLF-1200. URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/ta-instruments/product-38477-1796308.html> (дата обращения 15.03.2023).
20. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
21. Бартнев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. – Л.: Химия, 1990. – 432 с.
22. Энциклопедия полимеров. В 3 т. Т. 1 / под ред. В.А. Каргина. – М.: Сов. энциклопедия, 1972. – 1196 с.
23. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <https://www.chem21.info/info/312232/> (дата обращения 15.03.2023).
24. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture method of studying the resistance properties of disperse-filled elastomers // *Russian Physics Journal*. – 2000. – V. 43 (10). – P. 821–828.
25. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture analysis of the disperse structure of composite elastomers with a modified carbon filler // *Russian Physics Journal*. – 2002. – № 45 (2). – P. 185–189.

*Поступила: 03.04.2023 г.*

*Прошла рецензирование: 26.05.2023 г.*

#### Информация об авторах

**Минакова Н.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информационной безопасности Алтайского государственного университета.

**Ушаков В.Я.**, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.9:538.9

## THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS WITH CARBON COMPONENTS FOR ELECTRICAL DEVICES

Natalya N. Minakova<sup>1</sup>,  
minakova@asu.ru

Vasily Ya. Ushakov<sup>2</sup>,  
vyush@tpu.ru

<sup>1</sup> Altai State University,  
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

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

**The relevance** of the work is caused by the need to further improve the properties of composite materials – their manufacturability, resource and energy efficiency. The scope of such materials is expanding, covering, among other things, the exploration and production of oil and gas resources, due to the possibility of regulating their properties over a wide range. Resistive and insulating products made of polymer materials with carbon components are characterized by low weight and cost, as well as the availability of raw materials and industrial manufacturing technology. The variety of processes in filled polymers used in resistive structures at elevated temperatures requires the study of their thermophysical characteristics, which determine the processes of heat transfer in the material. Heat release and heat transfer in them are realized at different levels: electrically conductive mesh immersed in a polymer matrix. This makes it relevant to study thermophysical characteristics, which are formed due to a wide range of parameters.

**Purpose:** to study the thermophysical characteristics of rubbers filled with carbon black to increase the efficiency of their use in products and structures; to reveal the effect of carbon components on the thermophysical and structural characteristics of polymer composite materials.

**Methods:** instrumental measurements of thermophysical characteristics of materials, X-ray diffraction, statistical and correlation analyses.

**Results.** It was experimentally confirmed that thermophysical characteristics (heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity) depend on the type of binder base. Their relationship with the physical properties of the binder base and composite material is analyzed. The dependence of thermophysical characteristics on the degree of crystallinity of the binder component in the composite material was established – with an increase in the content of the crystalline phase in the polymer, the heat capacity, thermal conductivity and thermal diffusivity increase. Recommendations are formulated for the selection of a binder material for polymer composite materials with carbon components, depending on the nature of the thermal regime of the structure, for example, when operating in non-stationary thermal regimes.

### Key words:

Resource saving, polymer composite materials with carbon components, elastomers filled with carbon black, laser flash method, thermophysical characteristics, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, thermal diffusivity coefficient, heat exchange, heat transfer, crystalline phase.

The authors appreciate the assistance of Artur Nasyrbaev, engineer at School of Energy and Power Engineering TPU, in measuring.

### REFERENCES

- Quijada C. Conductive polymers: materials and applications. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 10, pp. 2344. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/10/2344/html> (accessed 15 February 2022).
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Polymers with carbon fillers for powerful resistors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 74–80. In Rus.
- Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites. *Composite Interfaces*, 2019, vol. 26, no. 8, pp. 729–750.
- Pyatov I.S., Tikhonova S.V., Salimon A.I., Vorobyeva L.V., Lunev V.V., Fomicheva L.E. *Elastomery i polimernye kompozitsii dlya neftepromysloвого oborudovaniya. Problem i vozmozhnosti* [Elastomers and polymeric compositions for oil-field equipment. Problems and possibilities]. OOO «REAM-RT». Available at: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2cdbe88098556f439ac345.pdf> (accessed 15 February 2022).
- Chen J. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications. *Polymer Reviews*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 157–193.
- Gao Q., Liu J., Liu X. Electrical conductivity and rheological properties of carbon black based conductive polymer composites prior to and after annealing. *Polymers and Polymer Composites*, 2021, vol. 29, no. 9, pp. 288–295.
- He X., Wang Y. Recent advances in the rational design of thermal conductive polymer composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, vol. 60, no. 3, pp. 1137–1154.
- Zhansakova K.S., Russkikh G.S., Eremin E.N. The effect of vulcanization accelerator on the properties of porous rubber. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 215–221.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Stochastic and deterministic modeling of spatially oriented structures in dispersion-filled polymers. *Polymer Science – Series A*, 1998, vol. 40 (9), pp. 1025–1029.
- Brunella V. Thermal/electrical properties and texture of carbon black PC polymer composites near the electrical percolation threshold. *Journal of Composites Science*, 2021, vol. 5, no. 8, pp. 212–220.
- Volkov D.P., Egorov A.G., Mironenko M.E. Thermophysical properties of polymer composite materials. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 287–293.
- Tomak V.I., Burkov F.S., Rytsarev A.M., Tovstonog V.A. Experimental assessment of the thermophysical characteristics of high-temperature heat-insulating materials. *Bulletin of the*

- Moscow State Technical University named after N. Bauman. Series «Natural Sciences», 2020, no. 2 (89), pp. 99–116.
13. Fokin V.M., Boikov G.P., Vidin Yu.V. *Fundamentals of technical thermal physics*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 172 p.
  14. Kreit O., Black U. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Mir Publ., 1983. 256 p.
  15. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 416 p.
  16. Bortnikov A.Yu., Minakova N. Structure analysis of electrically conductive polymers filled with agglomerated components. *Russian Physics Journal*, 2006, vol. 49 (11), pp. 1165–1170.
  17. Cowan R.D. Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures. *Journal of Applied Physics*, 1963, vol. 34, 926.
  18. Cape J.A., Lehman G.W. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity. *Journal of Applied Physics*, 1963, vol. 34, 1909.
  19. *Instruktsiya po rabote s priborom DLF-1200* [Instructions for working with the DLF-1200 device]. Available at: <https://www.directindustry.com.ru/product/ta-instruments/product-38477-1796308.html> (accessed 15 February 2023).
  20. Gul V.E., Shenfil L.Z. *Elektroprovodyashchie polimernye kompozity* [Electrically conductive polymer composites]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p.
  21. Bartenev G.M., Frenkel S.Ya. *Fizika polimerov* [Physics of polymers]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 432 p.
  22. *Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of polymers]. Ed. by V.A. Kargin. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1972. Vol. 1, 1196 p.
  23. *Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Reference book for a chemist. Chemistry and chemical technology]. Available at: <https://www.chem21.info/info/312232/> (accessed 15 March 2023).
  24. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture method of studying the resistance properties of disperse-filled elastomers. *Russian Physics Journal*, 2000, vol. 43, no. 10, pp. 821–828.
  25. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture analysis of the disperse structure of composite elastomers with a modified carbon filler. *Russian Physics Journal*, 2002, vol. 45, no. 2, pp. 185–189.

Received: 3 April 2023.  
Reviewed: 26 May 2023.

#### Information about the authors

*Natalya N. Minakova*, Dr. Sc., professor. Altai State University.

*Vasily Ya. Ushakov*, Dr. Sc., professor. National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 681.5:622.276.3

## РАЗРАБОТКА И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МЕХАНИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИРТУАЛЬНОГО РАСХОДОМЕРА ДЛЯ СКВАЖИН, ОБОРУДОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ

Илюшин Павел Юрьевич<sup>1</sup>,  
ilushin-pavel@yandex.ru

Вяткин Кирилл Андреевич<sup>1</sup>,  
kirill.vyatkin@girngm.ru

Козлов Антон Вадимович<sup>1</sup>,  
anton.kozlov@girngm.ru

Андреев Даниил Вячеславович<sup>1</sup>,  
d.andreev@girngm.ru

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность** исследования заключается в необходимости создания инструмента для расчета дебита скважин по косвенным признакам. В настоящее время широкое распространение принимают интеллектуальные станции управления, для работы которых необходимо наличие актуальных данных о состоянии работы скважины, в том числе дебите. Однако в современных условиях замеры дебита выполняются периодически, что не позволяет оперативно анализировать условия работы скважин и выполнять оптимизацию параметров работы глубинно-насосного оборудования. В связи с этим регулирование режимов работы скважин не является своевременным, что ведёт к снижению эффективности добычи нефти. Таким образом, возникает необходимость создания специального программного обеспечения для автоматического расчёта дебита скважин – виртуальных расходомеров. На сегодняшний день не существует виртуальных расходомеров, использующих все необходимые для расчёта и прогнозирования дебита физические данные со скважин.

**Цель:** создать наиболее точную модель механистического виртуального расходомера.

**Методы:** комплекс методик, основанных на технологических процессах для точного расчёта дебита и определения проблемных скважин; разработанный алгоритм для сверки и согласования полученных результатов расчётов.

**Результаты.** Получена комплексная модель механистического виртуального расходомера, исследующая все необходимые для расчёта дебита данные в ходе работы скважины. Расход рассчитывался на трёх скважинах в течение двух недель, затем сравнивался с фактическими значениями. Отклонение от реальных значений составило не более 8,7%. Проведена оценка коэффициентов корреляции для различных моделей расчёта дебита, выявлены оптимальные наборы моделей расчёта на малодобитных и высокодобитных скважинах. Также проведено тестирование виртуального расходомера на осложнённом фонде скважин. Исходя из полученных графиков можно сделать вывод, что возможно использование расходомера для предсказания различных аварийных ситуаций.

**Выводы.** Изучение уже существующих моделей механистических виртуальных расходомеров позволило понять, что не все необходимые данные используются для расчёта дебита скважины. Применение данной модели существенно повысит точность расчётных и прогнозируемых значений дебита, в том числе позволит идентифицировать различные осложнения в процессе добычи нефти. Таким образом, представленный в работе виртуальный расходомер внесёт существенный вклад в автоматизацию и цифровизацию нефтедобычи.

### Ключевые слова:

виртуальный расходомер, скважина, дебит, модель, осложнения.

### Введение

Множество нефтяных месторождений переходят на поздние стадии разработки, что сопровождается снижением дебитов скважин, увеличением обводнённости и интенсификацией возникновения осложнений [1]. Все это приводит к росту значимости оптимизации энергопотребления месторождения. Рассматривая структуру потребления электричества на одном из нефтяных месторождений, можно отметить, что основную роль играет механизированная добыча, ее доля может превышать 55% [2]. При этом основными способами оптимизации потребления электроэнергии являются автоматизация и интеллектуальное управление добывающим фондом [3–5].

На сегодняшний день стремительно развивается цифровизация всего нефтепромысла. Одним из этапов является разработка и внедрение интеллектуальных станций управления скважинами. В ходе их работы автоматически задаётся оптимальный режим работы скважин, что приводит к снижению энергопотребления, а также к уменьшению скорости износа нефтепромыслового оборудования. Для стабильного функционирования интеллектуальных станций необходимо постоянное измерение дебита. В современных условиях замеры количества добываемой нефти осуществляются с помощью автоматических групповых замерных установок (АГЗУ). Каждая установка отвечает за подключенную к ней группу скважин и проводит измерения дебита раз в заданный временной

интервал. Ввиду непостоянства дебита скважин и редкости замеров получаемые данные могут значительно отличаться от фактических. Помимо этого, все значения дебита анализируются вручную, что занимает достаточно много времени при большом фонде скважин [6]. Для того чтобы повысить качество промысловой информации и обеспечить регулярную оптимизацию ее работы, встал вопрос о создании специального программного обеспечения, виртуальных расходомеров, позволяющего на основе замеров данных и нейронных сетей отслеживать дебит в реальном времени.

Есть два основных подхода к созданию виртуальных расходомеров – управляемый данными (data-driven) и механистический. В основе первого подхода лежит создание математической модели на основе собранных выходных и входных данных с месторождения, без использования описания физических процессов в системе добычи и сбора нефти. Собранный массив данных обрабатывается для удаления некондиционных данных, после чего нейронная сеть сопоставляет обработанные входные и выходные данные, обучается и создает алгоритм расчёта дебита скважины. После создания модели она тестируется на данных, не используемых в процессе обучения [7, 8]. Активное применение нейронных сетей в создании виртуальных расходомеров описал Т. Аль-Кватими в своих работах [9–12]. Его модель обучалась алгоритмом оптимизации Левенберга–Маркарта и была проверена на данных, взятых с полугодовых испытаний скважины. Работы Г. Зангла, Р. Хасанванды и С. Бернети показывают успешное применение трёхслойной прямой нейросети, обученной методом градиентного спуска для прогнозирования дебита скважины [13, 14]. Н. Андрианов в своей работе рассмотрел применение рекуррентных нейронных сетей, основанных на использовании данных из прошлого. Помимо успешного прогнозирования дебита скважины, рекуррентные сети смогли предсказывать различные высокочастотные явления, такие как сильное замедление потока [15]. Второй подход подразумевает моделирование расхода скважины на основании замеров физических параметров добычи контрольно-измерительными приборами. Данные модели широко распространены в нефтяной отрасли и называются механистическими. Основными составляющими данных моделей являются: модель свойств жидкости, технологического процесса и алгоритм проверки и сверки данных (Data Validation and Reconciliation – DVR) [16, 17]. В качестве модели технологического процесса выступают модель притока пласта, термогидравлическая модель, модель дросселя и модель электрического погружного насоса, а также их комбинации [18–21]. Из наиболее актуальных моделей механистических виртуальных расходомеров можно выделить модели, описанные в работах [22–24]. Все представленные модели подразумевают оценку дебита, исходя из данных о работе ЭЦН, а именно по данным напора насоса и потребляемой мощности с учётом параметров газожидкостной смеси, таких как плотность и вязкость. Однако в данной работе не

учитываются потери давления на трение, что также влияет на точность расчёта дебита скважины.

Для настройки механистической модели необходимо корректное описание всех физических процессов, применяемых в качестве моделей технологического процесса. Несмотря на активную разработку механистических виртуальных расходомеров, существующие решения применяют только один из методов определения расхода. Также опыт применения некоторых моделей виртуального расходомера указывает на важность дополнительной настройки моделей с учетом особенностей эксплуатации скважины, таких как выпадение асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), образование солей и других [25–28].

В данной работе представлена комплексная модель механистического виртуального расходомера, созданного на основании промысловых данных с нефтяного месторождения. Приведен опыт применения системы на осложненном фонде скважин и системы для идентификации нарушений в работе глубинно-насосного оборудования.

#### Материалы и методы

Определение дебита скважины по косвенным параметрам является сложной технологической задачей, поскольку на результат расчета может повлиять множество изменяющихся параметров. Вследствие этого авторами применяется комплекс методик, основанных на моделях технологических процессов.

#### Модель жидкости

В рамках данной работы для описания физических свойств трехфазной жидкости будет использована модель «Black Oil». Данная модель представляет собой упрощенную модель пластового флюида, состоящего из нефти, попутного нефтяного газа и воды, и при помощи корреляционных зависимостей позволяет производить расчёты следующих характеристик флюида: плотность, вязкость, растворимость газа, коэффициент сжимаемости, z-фактор и др. [29].

#### Модель добычи нефти

Модель притока нефти в пласт представляется в виде зависимости величины дебита от создаваемой депрессии. Для определения формы кривой притока нефти в скважину на промысловых объектах выполняются исследования по снятию индикаторной кривой. Наиболее распространенными моделями притока нефти в скважину являются [30, 31]:

- Модель линейного притока (модель Дарси);
- Модель Вогеля;
- Модель Вогеля с поправкой на обводненность скважины.

Для оценки теоретического дебита необходимо построение характеристики скважины. Характеристика скважины представляет собой зависимость напора, требуемого для подъема жидкости на поверхность (и ее движения к пункту сбора), от расхода жидкости. В свою очередь, напор численно равен разнице между давлением на выкиде и приеме насоса. Оценка характеристики скважины проводится по

корреляции А. Hagedorn и К. Brown [32]. Данная модель выбрана ввиду своей универсальности. Так, в работе [33] проведено сравнение различных моделей многофазного течения, и лишь данная модель показывает приемлемую точность при различных режимах течения. В результате применения данной корреляции получена кривая потребного напора. При совмещении кривой потребного напора (характеристики скважины) и кривой притока нефти возможно определение точки пересечения данных кривых – рабочей точки, при которой создается баланс между притоком жидкости в скважину и оттоком из нее.

#### Модель погружного оборудования

В данной работе будет рассмотрен случай добычи нефти установкой электроцентробежного насоса, так как при этом способе добычи нефти возможно получение наибольшего количества исходных данных для определения дебита скважины. Для определения дебита по данным работы УЭЦН применяются две модели погружного оборудования.

1. Модель напорной характеристики насоса. По данной модели происходит наложение рассчитанной ранее характеристики скважины на напорную характеристику насоса, пересчитанную на условия добычи на конкретной скважине. Данный метод применим при наличии корректных исходных данных. Пересчет характеристики насоса проводится по методике, основанной на работах П.Д. Ляпкина и представленной в [34], а затем апробированной в [35]. При работе на вязких жидкостях напорную характеристику можно учесть по формулам (1) и (2):

$$Q_{\text{ЭЦН}v} = Q_{\text{ЭЦН}} \cdot K_{Qv}, \quad (1)$$

$$H_{\text{ЭЦН}v} = H_{\text{ЭЦН}} \cdot K_{Hv}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{ЭЦН}v}$  – подача ЭЦН с учетом свойств жидкости, м<sup>3</sup>/сут;  $Q_{\text{ЭЦН}}$  – подача ЭЦН без учета свойств жидкости, м<sup>3</sup>/сут;  $H_{\text{ЭЦН}v}$  – напор ЭЦН с учетом свойств жидкости, м;  $H_{\text{ЭЦН}}$  – напор ЭЦН без учета свойств жидкости, м;  $K_{Qv}$  и  $K_{Hv}$  – коэффициенты учета изменения подачи и напора из-за влияния вязкости.

Коэффициент изменения подачи из-за влияния вязкости определяется по формуле (3):

$$K_{Qv} = 1 - \frac{4,95 \cdot v^{0,85}}{Q_{\text{об}}^{0,57}}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{об}}$  – оптимальная подача ЭЦН на воде, м<sup>3</sup>/сут;  $v$  – кинематическая вязкость флюида, см<sup>2</sup>/с.

Коэффициент изменения напора из-за влияния вязкости определяется по формуле (4):

$$K_{Hv} = 1 - \frac{1,07 \cdot v^{0,6} \cdot q_{\text{пр}}}{Q_{\text{об}}^{0,57}}. \quad (4)$$

Относительная подача на входе в насос ( $q_{\text{пр}}$ ) на номинальной характеристике насоса определяется по формуле (5):

$$q_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{ЭЦН}} \cdot B \cdot K_{Qv}}{Q_{\text{об}}}, \quad (5)$$

где  $B$  – объёмный коэффициент жидкости при давлении на входе в насос, о. е.

2. Модель потребляемой мощности. По данной модели определение дебита осуществляется по текущему энергопотреблению глубинно-насосного оборудования.

Эти методы применимы при условии наличия информации о фактическом энергопотреблении глубинного оборудования и напорной кривой. В рамках данной работы расчет энергопотребления выполнялся на скважинах с известной зависимостью потребления электроэнергии от дебита скважины, а также влиянием расхода жидкости на развиваемый насосом напор.

Согласно исследованиям, напорная и мощностная характеристики ЭЦН напрямую зависят от свойств перекачиваемой жидкости. В работах [36, 37] изложены эмпирически и теоретически созданные алгоритмы пересчета напора, подачи, КПД и мощности насоса от свойств перекачиваемой жидкости.

#### Модель потерь давления в лифтовой колонне

Основным способом определения дебита скважины косвенным методом является анализ потерь давления на трение в скважине. Для этого представим лифтовую колонну скважины от УЭЦН до устья как трубопровод с газожидкостной смесью. В качестве входных данных для расчёта необходимо наличие следующих исходных данных:

- конструкция скважины (инклинометрия, диаметр насосно-компрессорных труб);
- замеры дебитов по фазам, необходимые для калибровки расчётной модели;
- параметры добычи нефти: устьевое и затрубное давления, давление на входе и выходе из насоса, температура жидкости в НКТ, тип насоса, частота его работы;
- свойства флюида: плотность воды, нефти, газа, давление насыщения, газовый фактор, обводненность.

В общем случае алгоритм оценки расчетного дебита по модели потерь давления заключается в следующем:

1. Паспортная характеристика пересчитывается с учетом частоты работы насоса по известной зависимости: линейное влияние на напор, квадратичное на дебит и кубическое на мощность.
2. Проводится гидростатический расчет трубопровода с известным давлением на выходе (буферное давление) при различных предполагаемых значениях дебита скважины и определяется давление на выходе в трубопровод.
3. Полученное значение давления в начале «трубопровода» сравнивается с напором установки при принятом расходе. При отклонении менее 10 % расчет прекращается.

В данном случае расчет распределения давления также выполняется по модели Hagedorn и Brown, упомянутой ранее. Данный способ позволяет с достаточной точностью определить расчетный дебит в скважине на основании фактических данных о ее работе.

Модели потерь давления при штучерировании скважины и движении в линейном трубопроводе

Данные модели применяются как дополнительные для определения расчетного дебита. Алгоритм их работы основан на тех же данных, что и предыдущий, однако в данных моделях давление в начале участка известно.

Модель штуцера предполагает расчет дебита скважины по потерям давления в штуцерной камере. Расчеты производятся по модели, приведенной в работах [38, 39]. Основные положения метода приведены в выражениях (6), (7).

$$Q = 0,1683 \cdot C_{ш} \cdot A \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{ж}}}, \quad (6)$$

$$C_{ш} = \frac{d_{ш}}{d_{тр}} + \frac{0,3167}{\left(\frac{d_{ш}}{d_{тр}}\right)^{0,6}} + 0,025 [\log(N_{Re}) - 4], \quad (7)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность поднимаемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – расход жидкости через штуцер, м<sup>3</sup>/сут;  $C_{ш}$  – коэффициент расхода дросселя;  $A$  – площадь дросселя, м<sup>2</sup>;  $\Delta P$  – перепад давления, МПа;  $d_{ш}$  – диаметр штуцера, м;  $d_{тр}$  – диаметр линейного трубопровода, м;  $N_{Re}$  – число Рейнольдса.

Вторая модель – модель потери давления в линейном трубопроводе. Данная модель заключается в расчете потерь давления при движении жидкости от скважины до АГЗУ. В качестве исходных данных для модели применяются линейное давление на скважине и давление в коллекторе АГЗУ. Гидравлический расчет выполняется по уравнению Бернулли с учетом потерь на трение (8), при этом сечением 1 считается устье скважины, а сечением 2 – коллектор АГЗУ.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_{тр}, \quad (8)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – средние скорости движения в сечениях 1 и 2, м/с;  $p_1$  и  $p_2$  – давления в сечениях 1 и 2, МПа;  $h_{тр}$  – потери давления на трение, МПа;  $z_1$  и  $z_2$  – высоты положения в сечениях 1 и 2, м.

При этом в данном уравнении скорости  $V_1$  и  $V_2$  принимаются одинаковыми, так как диаметр трубы постоянный. Расчет потерь давления на трение выполнялся по формуле Дарси–Вейсбаха. В результате расчета определяется расход жидкости, при котором потери давления совпадают с фактическими.

Применение всех трех моделей (потери в лифтовой колонне, в штуцере и линейном трубопроводе) позволяют с высокой точностью определять дебит и корректность исходных данных. При этом при отклонении одной из кривых возможна идентификация осложнений в скважине, например, закупоривание лифтовой колонны, линейного трубопровода или образование высоковязкой эмульсии.

Методика проверки и согласования данных

В конечном итоге при наличии всех необходимых исходных данных с заданной периодичностью определяется пять значений расчетных дебитов скважины. Следующим шагом является обработка получаемой информации, что также является немаловажным процессом. В рамках эксплуатации разработанной меха-

нистической модели «Виртуального расходомера» расчетный дебит определялся каждую минуту. В течение этого времени расчетные дебиты скважин по всем пяти моделям рассчитывались каждые 10 секунд. В случае, если все значения расчетного дебита для каждого отдельно взятого метода отличаются друг от друга на величину не более 5 %, эти данные усредняются. Если среди массива вычислений по модели напорной характеристики насоса или потребляемой мощности значения расчетного дебита отклоняются от остальной массы, эти замеры не учитываются при определении среднего значения расчетного дебита. В ином случае все замеры усредняются вне зависимости от разброса расчетных значений. В результате каждую минуту оператор видит пять замеров виртуального дебита, и при их относительной сходимости (менее 5 %) среднее значение может приниматься за действительный расчетный дебит. В этом случае полученное значение может быть соотнесено с дебитом, полученным по замеру на АГЗУ. В случае регулярного отклонения расчетных дебитов работу модели необходимо анализировать специалисту для определения причины отклонения. Причиной могут являться некорректные исходные данные, осложнения при добыче нефти или ошибки при моделировании процесса движения продукции. В табл. 1 описаны технологические параметры для каждой модели. Для удобства отображения информации введем следующие условные обозначения: расчетный дебит по модели напорной характеристики насоса –  $Q_H$ ; по модели потребляемой мощности –  $Q_N$ ; по модели потерь давления в лифтовой колонне –  $Q_T$ ; по модели штуцера –  $Q_{ш}$ ; по модели потерь давления в линейном трубопроводе –  $Q_L$ . Фактические данные дебита скважины по АГЗУ обозначаются как  $Q_{ф}$ .

Таблица 1. Используемые технологические параметры для каждой модели

Table 1. Technological parameters used for each model

Технологические параметры Technological parameters	Название модели Model name				
	$Q_H$	$Q_N$	$Q_T$	$Q_{ш}$	$Q_L$
Паспортная характеристика насоса Pump passport characteristics	+	+	–	–	–
Потребляемая мощность насоса Pump power consumption	–	+	–	–	–
Физико-химические свойства добываемого флюида Physico-chemical properties of the extracted fluid	+	+	+	+	+
Частота работы электродвигателя Electric motor operation frequency	+	+	–	–	–
Конструкция скважины/Well design	+	+	+	–	–
Буферное давление/Buffer pressure	+	+	+	+	–
Затрубное давление/Annular pressure	+	+	–	–	–
Динамический уровень/Dynamic level	+	+	–	–	–
Давление на выходе из насоса Pressure at the pump outlet	–	–	+	–	–
Диаметр штуцера/Fitting diameter	–	–	–	+	–
Конструкция линейного трубопровода Linear pipeline design	–	–	–	+	+
Линейное давление/Linear pressure	–	–	–	+	+
Давление на входе в АГЗУ Pressure at the entrance to the automatic group metering unit	–	–	–	–	+

### Результаты

Созданная механистическая модель проверена на реальных промысловых данных нескольких нефтедо-

бывающих скважин, оборудованных установками электроцентробежного насоса. На рис. 1 представлена напорная характеристика насоса для скважины № 3.

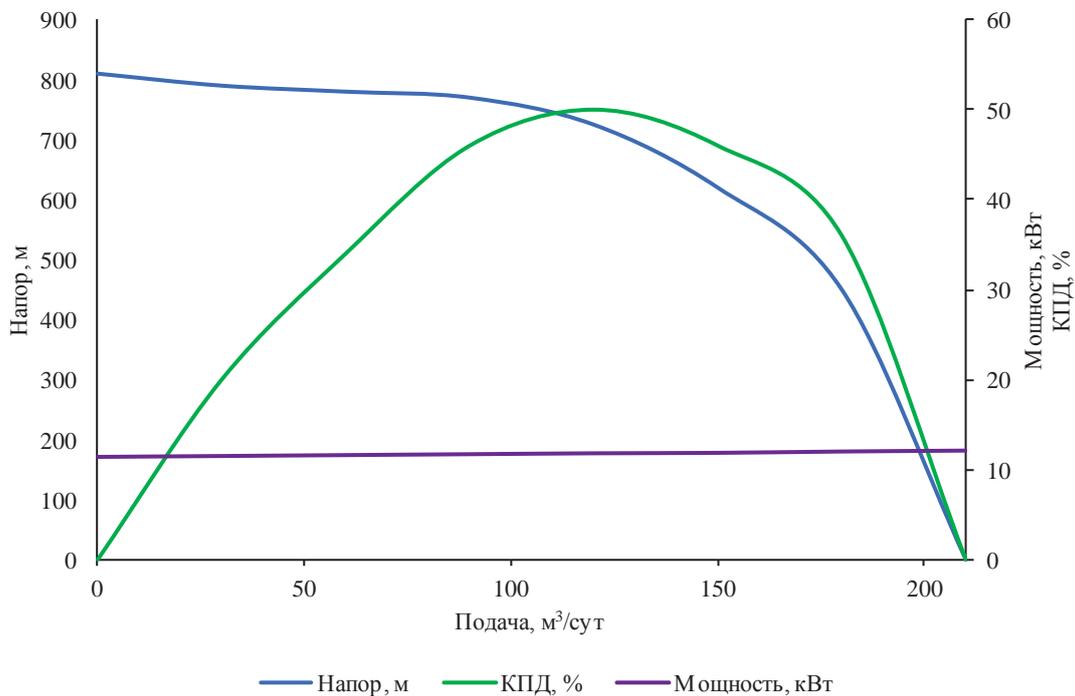


Рис. 1. Напорная характеристика насоса для скважины № 3

Fig. 1. Pump pressure characteristics for well no. 3

На рис. 2 приведена динамика фактического и расчетного дебитов скважин по трем нефтедобывающим скважинам в течение 2 недель. Стоит отметить, что изменение расчетного дебита происходит ввиду изменения технологических показателей добычи: забортного давления, динамического уровня, потребляемой мощности насоса и т. д.).

На основании анализа результатов тестирования технологии можно заключить, что при расчете среднего значения расчетного дебита, определенного по всем примененным моделям, отклонение от фактического дебита не превышает 8,7 %.

Важным с научной точки зрения является заключение о минимально необходимом количестве настроенных моделей дебита, так как увеличение количества моделей может повлечь за собой не только снижение погрешности, но и увеличение трудоемкости работ по их настройке. С этой целью проведена оценка линейного коэффициента корреляции (коэффициента корреляции Пирсона) для всех возможных комбинаций созданных моделей. Данный коэффициент рассчитывается как отношение коэффициента ковариации (математическое ожидание произведения отклонений рассматриваемых величин) и стандартных отклонений данных величин. В табл. 2, 3 приведены результаты оценки коэффициента корреляции для комбинаций двух, трех и четырех моделей для первой скважины.

Таблица 2. Результаты оценки коэффициента корреляции для двух и трех моделей дебита скважины

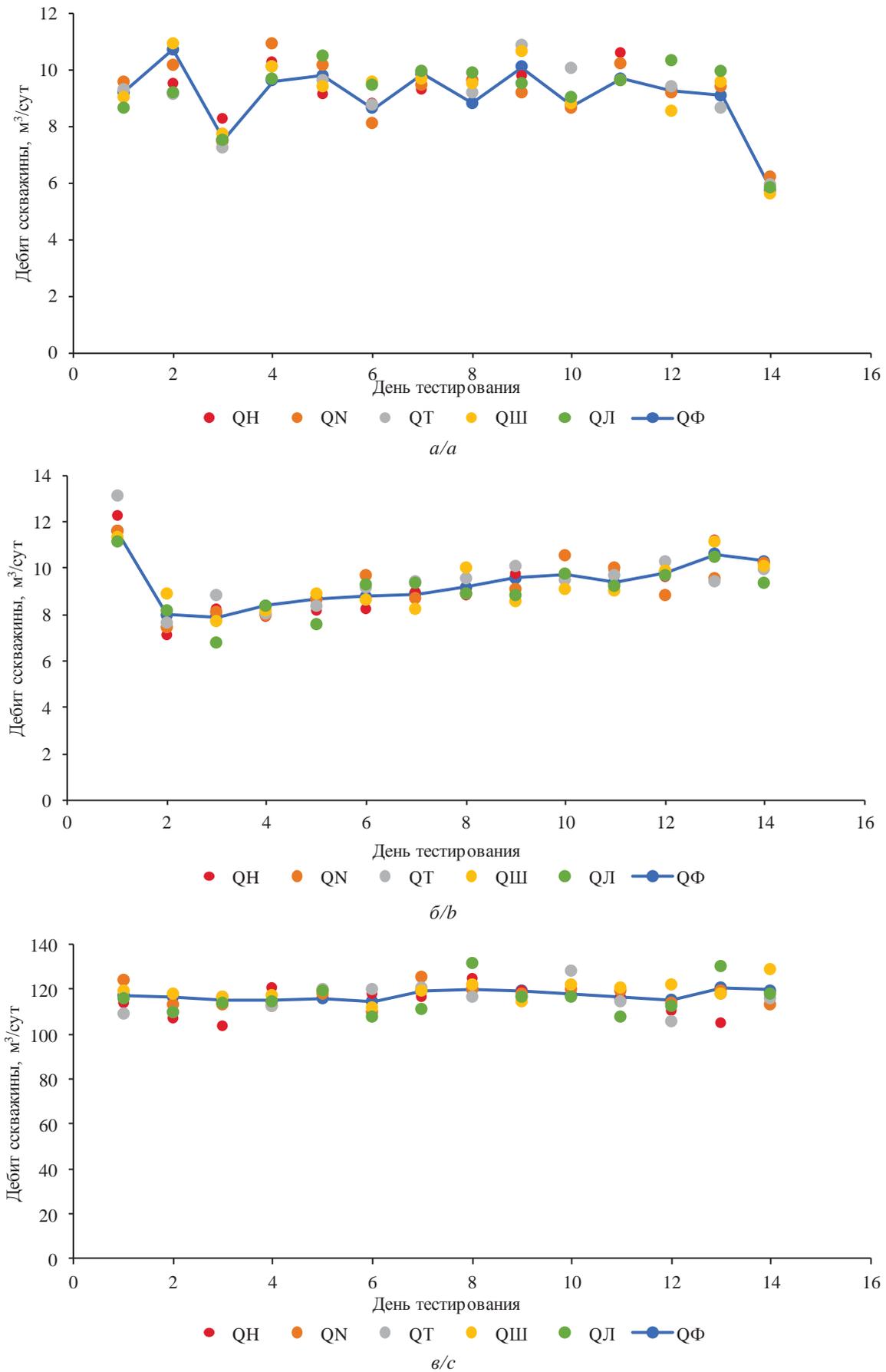
Table 2. Results of the correlation coefficient estimation for two and three well flow rate models

Первая модель First model	Вторая модель Second model	Третья модель/Third model				
		$Q_H$	$Q_N$	$Q_T$	$Q_{Ш}$	$Q_L$
$Q_H$	–	0,864	0,899	0,901	0,936	0,886
	$Q_N$	–	–	0,922	0,944	0,910
	$Q_T$	–	0,922	–	0,940	0,907
	$Q_{Ш}$	–	0,944	0,940	–	0,936
	$Q_L$	–	0,910	0,907	0,936	–
$Q_N$	–	0,899	0,885	0,922	0,957	0,903
	$Q_T$	–	–	–	0,957	0,922
	$Q_{Ш}$	–	–	0,957	–	0,951
	$Q_L$	–	–	0,922	0,951	–
$Q_T$	–	0,901	0,922	0,856	0,940	0,888
	$Q_{Ш}$	–	–	–	–	0,940
	$Q_L$	–	–	–	0,940	–
$Q_{Ш}$	–	0,936	0,954	0,940	0,937	0,939
$Q_L$	–	0,886	0,903	0,888	0,939	0,830

Таблица 3. Результаты оценки коэффициента корреляции для четырех моделей дебита скважины

Table 3. Results of the correlation coefficient estimation for four well flow rate models

Исключаемая модель/Excluded model					
–	$Q_H$	$Q_N$	$Q_T$	$Q_{Ш}$	$Q_L$
0,946	0,952	0,939	0,943	0,923	0,949



**Рис. 2.** Результаты тестирования технологии на скважине: № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в)  
**Fig. 2.** Results of technology testing at the well: no. 1 (a); no. 2 (b); no. 3 (c)

Анализируя табл. 2, 3, стоит отметить, что наибольшим коэффициентом корреляции обладают модель  $Q_N + Q_{Ш}$ . При этом высокий общий уровень корреляции, что говорит о высокой точности модели виртуального расходомера. Для второй скважины наиболее оптимальной моделью определена  $Q_H + Q_{Ш} + Q_N$  с коэффициентом корреляции 0,975, а для третьей –  $Q_{Ш} + Q_N + Q_L$  с коэффициентом корреляции 0,772. Очевидно, что в результате этого анализа можно заключить, что с достаточной точностью определить дебит можно по трем моделям дебита, однако для каждой из скважин этот набор уникален. Наибольшее внимание для малодобитных скважин ( $Q < 15 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) необходимо уделять модели напора насоса, потребляемой мощности и штуцера. Для данной группы скважин применение модели потерь давления возможно лишь

при возникновении условий значительных потерь давления на трение (малый диаметр трубопровода, высокая вязкость продукции или значительная длина), которые отсутствовали в целевой скважине. Для высокодобитных скважин ( $Q < 100 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) модели потерь давления в трубопроводе, штуцере и потребления электроэнергии будут более справедливы.

Однако модель виртуального расходомера может быть применена не только в условиях работы скважины без осложнений, а также для их идентификации. Далее представлен опыт идентификации различных отклонений в работе скважины по данным виртуального расходомера.

На рис. 3 представлен пример работы технологии «Виртуальный расходомер» на скважине № 4, на которой идентифицировано отклонение в работе АГЗУ.

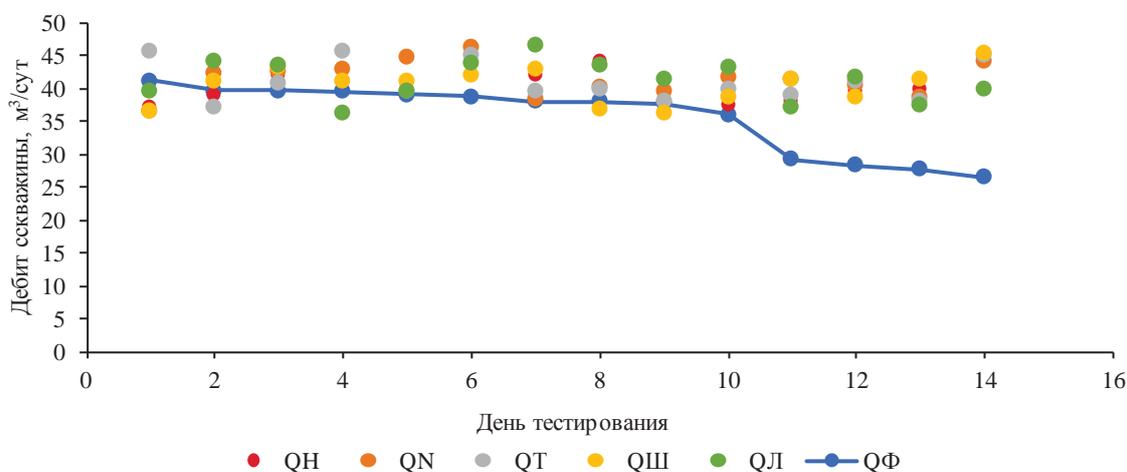


Рис. 3. Применение технологии на скважине № 4

Fig. 3. Application of technology at well no. 4

На данном рисунке можно отметить, что расчетные дебиты по описанным ранее моделям незначительно отклоняются от фактической величины в течение первых 10 дней замеров. После чего замеры по АГЗУ начинают резко снижаться при постоянстве геолого-технических и энергетических параметров

работы скважины. Это указывает на нарушения в работе АГЗУ, засорение установки или некорректную работу расходомера.

На рис. 4 представлен пример работы технологии на скважине № 5, на которой идентифицируется образование органических отложений в лифтовой колонне.

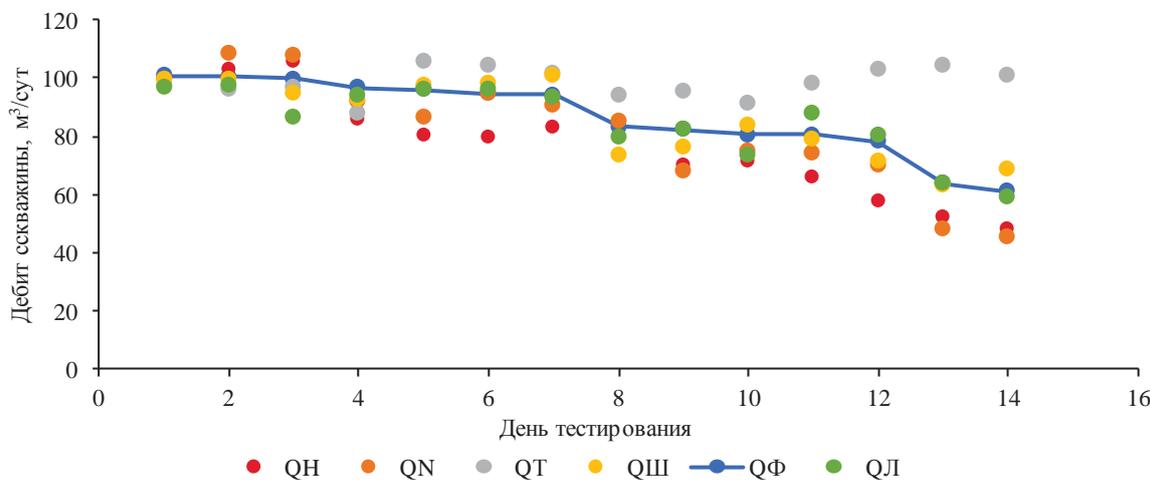


Рис. 4. Применение технологии на скважине № 5

Fig. 4. Application of technology at well no. 5

На данном рисунке видно, что в начале испытаний расчетные значения дебита незначительно отклоняются от фактического значения, после чего происходит плавное снижение всех замеров, кроме замеров по потерям давления на трение. Анализируя промышленную информацию, очевидно, что в лифтовой колонне начинается образование органических отложений, происходит увеличение напора насоса, что при-

водит к снижению его дебита. Однако в модели потеря давления на трение увеличивается перепад давления на движение жидкости по лифтовой колонне, что приводит к увеличению расчетного дебита.

На рис. 5 представлен опыт идентификации изменения геологических условий добычи нефти, полученный на скважине № 6.

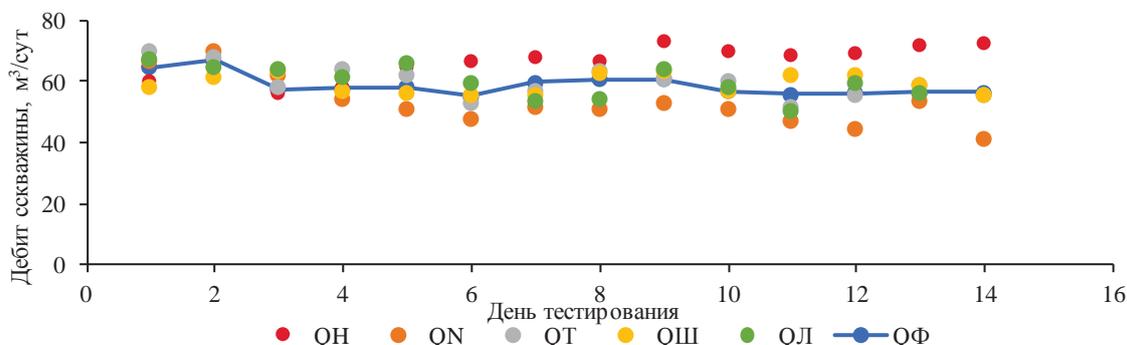


Рис. 5. Применение технологии на скважине № 6

Fig. 5. Application of technology at well no. 6

На данном рисунке видно, что отклонение наблюдается по модели напора насоса, при этом некоторое снижение происходит по модели потребления электроэнергии. Анализируя промышленную информацию, можно отметить, что во время испытаний произошла остановка на ремонт интерферирующей нагнетательной скважины. Это привело к изменению геологических условий добычи нефти, снижению пластового давления и росту потребного напора. Однако данное изменение не учитывается в построении характеристики скважины, вследствие чего она не пересчитывается и получаемые значения дебита являются завышенными.

#### Заключение

На сегодняшний день цифровизация является неотъемлемой частью всей нефтедобывающей отрасли. В условиях необходимости непрерывной оптимизации процесса добычи нефти важным вопросом является корректный расчет дебитов скважин. Вследствие замера данного параметра групповыми установками значения дебита скважин регистрируются не регулярно, а раз в заданный период, который составляет от 1 до 7 дней. Вследствие этого получаемые данные в контексте актуализации параметров работы скважины перестают быть актуальными. Эти обстоятельства ведут к несвоевременному регулированию режимов работы скважин, что приводит к снижению эффективности добычи нефти. Для решения данной

проблемы разработана комплексная модель механистического виртуального расходомера, основанного на анализе множества промышленных данных. Опыт применения модели представлен двумя неделями тестирования на трех нефтедобывающих скважинах. По результатам тестирования отклонение расчетного дебита от фактического не превышает 8,7%. На основании статистической обработки данных определены наиболее значимые модели. В результате получено, что для расчета дебита малодебитных скважин наиболее подходят комбинации модели напора насоса, потребляемой мощности и штуцера. Для расчета высокодебитных скважин стоит использовать набор, состоящий из модели потерь давления в трубопроводе, штуцера и потребления электроэнергии. Помимо этого, представленный в работе виртуальный расходомер смог определять проблемные скважины с неисправностями в глубинно-насосном и поверхностном оборудовании.

Работа выполнена в организации Головного исполнителя в рамках выполняемой составной части НИОКТР, проводимой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2021-052 от 24 июня 2021 г.) в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 (ПРОЕКТ 218). Головной исполнитель НИОКТР – ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development and verification of a software module for predicting the distribution of wax deposition in an oil well based on laboratory studies // Results in Engineering. – 2022. – V. 16. – P. 100697.
2. Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю., Сипайлов В.А. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия // Из-

1. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 75–84.
3. An automation system for gas-lifted oil wells: model identification, control, and optimization / E. Camponogara, A. Plucenio, A.F. Teixeira, S.R. Campos // Journal of petroleum science and engineering. – 2010. – V. 70. – № 3-4. – P. 157–167.
4. Jia A., Guo J. Key technologies and understandings on the construction of Smart Fields // Petroleum Exploration and Development. – 2012. – V. 39. – P. 127–131.

5. Study of the intelligent completion system for Liaohe oil field / Z. Huang, Y. Li, Y. Peng, Z. Shen, W. Zhang, M. Wang // *Procedia Engineering*. – 2011. – V. 15. – P. 739–746.
6. Илюшин П. Ю., Вяткин К. А., Козлов А. В. Разработка интеллектуальных алгоритмов управления периферийным технологическим оборудованием куста скважин с помощью единой станции управления // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 59–68.
7. Bikmukhametov T., Jäschke J. First principles and machine learning virtual flow metering: a literature review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – V. 184. – P. 106487.
8. Song S. An intelligent data-driven model for virtual flow meters in oil and gas development // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2022. – V. 186. – P. 398–406.
9. Al-Qutami T. A., Ibrahim R., Ismail I. Hybrid neural network and regression tree ensemble run by simulated annealing for virtual flow metering application // *2017 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*. – Kuching, Malaysia, 2017. – P. 304–309.
10. Al-Qutami T. A. Development of soft sensor to estimate multiphase flow rates using neural networks and early stopping // *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. – 2017. – V. 10. – № 1. – P. 1–24.
11. Al-Qutami T. A. Radial basis function network to predict gas flow rate in multiphase flow // *Proceedings of the 9th International Conference on Machine Learning and Computing*. – Singapore, 2017. – P. 141–146.
12. Al-Qutami T. A. Virtual multiphase flow metering using diverse neural network ensemble and adaptive simulated annealing // *Expert Systems with Applications*. – 2018. – V. 93. – P. 72–85.
13. Zangl G., Hermann R., Schweiger C. Comparison of methods for stochastic multiphase flow rate estimation // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Houston, Texas, USA, 2014. – P. 1–15.
14. Hasanvand M., Berneti S. M. Predicting oil flow rate due to multiphase flow meter by using an artificial neural network // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2015. – V. 37. – № 8. – P. 840–845.
15. Andrianov N. A machine learning approach for virtual flow metering and forecasting // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – V. 51. – № 8. – P. 191–196.
16. Falcone G., Hewitt G., Alimonti C. *Multiphase flow metering: principles and applications*. – Amsterdam: Elsevier Publ., 2009. – 328 p.
17. Heddle R., Foot J., Rees H. ISIS rate & phase: delivering virtual flow metering for 300 wells in 20 fields // *SPE Intelligent Energy International*. – Aberdeen, Scotland, UK, 2012.
18. Golan M., Whitson C. H. *Well performance*. – Hoboken: Prentice Hall Publ., 1991. – 669 p.
19. Shippen M., Bailey W. J. Steady-state multiphase flow past, present, and future, with a perspective on flow assurance // *Energy & Fuels*. – 2012. – V. 26. – № 7. – P. 4145–4157.
20. Buffa F. K., Balaño J. L. Review of multiphase flow models for choke valves // *Journeys in Multiphase Flows (JEM2017)*. – São Paulo, March 27–31, 2017. – V. 41. – P. 1–12.
21. Lea J. F. *Electrical submersible pumps: on and offshore problems and solutions* // *International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico*. – Veracruz, Mexico, 1994. – P. 249–275.
22. Способ определения дебита скважин, оборудованных насосными установками: пат. Рос. Федерация, № 2575785, заявл. 10.09.2013; опубл. 20.02.2016.
23. Ивановский В. Н., Сабиров А. А., Герасимов И. Н. Разработка и внедрение виртуального расходомера для скважин, оборудованных установками центробежных насосов // *Территория Нефтегаз*. – 2016. – № 11. – С. 115–120.
24. Итоги сертификационных испытаний виртуального расходомера «БИНУС» для замера дебита нефтяных скважин / Ю. А. Донской, И. Н. Герасимов, В. С. Баканев и др. // *Территория Нефтегаз*. – 2022. – № 7–8. – С. 96–102.
25. Varyan R., Haug R. K., Fonnes D. G. Investigation on the suitability of virtual flow metering system as an alternative to the conventional physical flow meter // *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. – Bali, Indonesia, 2015. – P. 1–12.
26. Amin A. Evaluation of commercially available virtual flow meters (VFM) // *Offshore Technology Conference*. – Houston, Texas, USA, 2015. – P. 1–26.
27. Hotvedt M., Grimstad B., Imsland L. Developing a hybrid data-driven, mechanistic virtual flow meter—a case study // *IFAC-PapersOnLine*. – 2020. – V. 53. – № 2. – P. 11692–11697.
28. Bello O., Ade-Jacob S., Yuan K. Development of hybrid intelligent system for virtual flow metering in production wells // *SPE Intelligent Energy Conference & Exhibition*. – Utrecht, The Netherlands, 2014. – P. 1–8.
29. Mukherjee H., Brill J. P. *Multiphase flow in wells*. – Richardson: Society of Petroleum Engineers of AIME, 1999. – 149 p.
30. Vogel J. V. Inflow performance relationships for solution-gas drive wells // *Journal of petroleum technology*. – 1968. – V. 20. – № 01. – P. 83–92.
31. Adeyemi T. S., Rufus D. O. Analytical development of an improved Inflow Performance Relationship (IPR) model for solution gas drive reservoirs // *Journal of Human, Earth, and Future*. – 2021. – V. 2. – № 2. – P. 125–135.
32. Hagedorn A. R., Brown K. E. Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small-diameter vertical conduits // *Journal of Petroleum Technology*. – 1965. – V. 17. – № 04. – P. 475–484.
33. Cox S. A. Errors introduced by multiphase flow correlations on production analysis // *SPE annual Technical Conference*. – San Antonio, Texas, USA, 2006. – P. 1–11.
34. Ивановский В. Н., Пекин С. С., Янгулов П. Л. Влияние вязкой жидкости на рабочую характеристику погружных электроцентробежных насосов // *Территория нефтегаз*. – 2012. – № 9. – С. 48–55.
35. Development of a method for improving the energy efficiency of oil production with an electrical submersible pump / A. Petrochenkov, P. Ilyushin, S. Mishurinskikh, A. Kozlov // *Inventions*. – 2023. – V. 8. – № 1 – P. 29.
36. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation / A. Lyakhomskii, A. Petrochenkov, A. Romodin, E. Perfil'eva, S. Mishurinskikh, A. Kokorev, A. Kokorev, S. Zuev // *Energies*. – 2022. – V. 15. – № 7. – P. 2409.
37. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В. Н. Ивановский, В. И. Дарищев, А. А. Сабиров, В. С. Каштанов, С. С. Пекин. – М.: Нефть и газ, 2002. – 824 с.
38. Guo B., Lyons W. C., Ghalambor A. *Petroleum production engineering. A computer-assisted approach*. – Houston: Gulf Professional Publ., 2007. – 287 p.
39. Boyan G., Ghalambor A. *Natural gas engineering handbook*. – Houston: Gulf Professional Publ., 2014. – 472 p.

Поступила: 23.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 28.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Илюшин П. Ю.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Вяткин К. А.**, аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Козлов А. В.**, инженер кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Андреев Д. В.**, лаборант-исследователь кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 681.5: 622.276.3

## DEVELOPMENT AND EXPERIENCE IN APPLICATION OF A COMPLEX MECHANISTIC MODEL OF A VIRTUAL FLOW METER FOR WELLS EQUIPPED WITH ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMPS

Pavel Yu. Ilyushin<sup>1</sup>,  
ilyushin-pavel@yandex.ru

Kirill A. Vyatkin<sup>1</sup>,  
kirill.vyatkin@girngm.ru

Anton V. Kozlov<sup>1</sup>,  
anton.kozlov@girngm.ru

Daniel V. Andreev<sup>1</sup>,  
d.andreev@girngm.ru

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance** of the study lies in the need to create a tool for calculating the flow rate of wells by indirect signs. Currently, intelligent control stations, for the operation of which it is necessary to have up-to-date data on the state of well operation, including flow rate, are widely used. However, in modern conditions, flow rate measurements are performed periodically, which does not allow quickly analyzing the operating conditions of wells and optimizing the operation parameters of downhole pumping equipment. In this regard, the regulation of well operation modes is not timely, which leads to decrease in the efficiency of oil production. Thus, there is a need to create special software for automatic calculation of well flow rates – virtual flow meters. To date, there are no virtual flow meters that use all the physical data from wells necessary for calculating and predicting the flow rate.

**Purpose:** to create the most accurate model of a mechanistic virtual flow meter.

**Methods:** set of techniques based on technological processes for accurate calculation of production rates and identification of problem wells; developed algorithm for reconciliation and agreement of the obtained calculation results.

**Results.** As a result, a new mechanical virtual flow meter model was obtained. It examines all the data necessary for calculating the flow rate during well operation. The flow rate was calculated on three wells within two weeks, then compared with the actual values. The deviation from the real values was no more than 8,7 %. The evaluation of correlation coefficients for various models for calculating the flow rate was carried out, the optimal sets of calculation models for low-rate and high-rate wells were identified. A virtual flow meter was also tested on a complicated well stock. Based on the graphs obtained, it can be concluded that it is possible to use the flow meter to predict various emergency situations.

**Conclusions.** The study of already existing models of mechanistic virtual flow meters made it possible to understand that not all the necessary data are used to calculate the well flow rate. The use of this model will significantly improve the accuracy of the calculated and predicted flow rates, including the identification of various complications in oil production. Thus, the virtual flowmeter presented in the paper will make a significant contribution to the automation and digitalization of oil production.

### Key words:

virtual flow meter, well, flow rate, model, complications.

The work was carried out in the organization of the Lead Contractor as part of the R&D, with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement number 075-11-2021-052 of 24 June 2021) in accordance with the decree of the Government of the Russian Federation: 09.04.2010, number 218 (PROJECT 218). The main R&D contractor is the Perm National Research Polytechnic University.

### REFERENCES

- Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development and verification of a software module for predicting the distribution of wax deposition in an oil well based on laboratory studies. *Results in Engineering*, 2022, vol. 16, pp. 100697.
- Bukreev V.G., Sipajlova N.Yu., Sipaylov V.A. Management strategy of the electrotechnical complex of mechanized oil production based on the economic criterion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 75–84. In Rus.
- Camponogara E., Plucenio A., Teixeira A.F., Campos S.R. An automation system for gas-lifted oil wells: Model identification, control, and optimization. *Journal of petroleum science and engineering*, 2010, vol. 70, no. 3–4, pp. 157–167.
- Jia A., Guo J. Key technologies and understandings on the construction of Smart Fields. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, vol. 39, pp. 127–131.
- Huang Z., Li Y., Peng Y., Shen Z., Zhang W., Wang M. Study of the intelligent completion system for Liaohe oil field. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 15, pp. 739–746.
- Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development of intelligent algorithms for controlling peripheral technological equipment of the well cluster using a single control station. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 59–68. In Rus.
- Bikmukhametov T., Jäschke J. First principles and machine learning virtual flow metering: a literature review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 184, pp. 106487.
- Song S. An intelligent data-driven model for virtual flow meters in oil and gas development. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 186, pp. 398–406.
- Al-Qutami T.A., Ibrahim R., Ismail I. Hybrid neural network and regression tree ensemble pruned by simulated annealing for virtual flow metering application. *2017 IEEE International Conference on*

- Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*. Kuching, Malaysia, 2017. pp. 304–309.
10. Al-Qutami T.A. Development of soft sensor to estimate multiphase flow rates using neural networks and early stopping. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 1–24.
  11. Al-Qutami T.A. Radial basis function network to predict gas flow rate in multiphase flow. *Proceedings of the 9th International Conference on Machine Learning and Computing*. Singapore, 2017. pp. 141–146.
  12. Al-Qutami T.A. Virtual multiphase flow metering using diverse neural network ensemble and adaptive simulated annealing. *Expert Systems with Applications*, 2018, vol. 93, pp. 72–85.
  13. Zangl G., Hermann R., Schweiger C. Comparison of methods for stochastic multiphase flow rate estimation. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas, USA, 2014. pp. 1–15.
  14. Hasanvand M., Berneti S.M. Predicting oil flow rate due to multiphase flow meter by using an artificial neural network. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2015, vol. 37, no. 8, pp. 840–845.
  15. Andrianov N. A machine learning approach for virtual flow metering and forecasting. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 8, pp. 191–196.
  16. Falcone G., Hewitt G., Alimonti C. *Multiphase flow metering: principles and applications*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2009. 328 p.
  17. Heddle R., Foot J., Rees H. ISIS rate & phase: delivering virtual flow metering for 300 wells in 20 fields. *SPE Intelligent Energy International*. Aberdeen, Scotland, UK, 2012.
  18. Golan M., Whitson C.H. *Well performance*. New Jersey, Prentice Hall Publ., 1991. pp. 669.
  19. Shippen M., Bailey W.J. Steady-state multiphase flow past, present, and future, with a perspective on flow assurance. *Energy & Fuels*, 2012, vol. 26, no. 7, pp. 4145–4157.
  20. Buffa F.K., Balaño J.L. Review of multiphase flow models for choke valves. *Journeys in Multiphase Flows (JEM2017)*. São Paulo, March 27–31, 2017. Vol. 41, pp. 1–12.
  21. Lea J.F. Electrical submersible pumps: on and offshore problems and solutions. *International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico*. Veracruz, Mexico, 1994. pp. 249–275.
  22. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Yakimov S.B. *Sposob opredeleniya debita skvazhin, oborudovannykh nasosnymi ustanovkami* [Method for determining the flow rate of wells equipped with pumping units]. Patent RF, no. 2575785, 2016.
  23. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Gerasimov I.N. Development and implementation of a virtual flow meter for wells equipped with centrifugal pump installations. *Territory of Neftegaz*, 2016, no. 11, pp. 115–120. In Rus.
  24. Donskoy Yu.A., Gerasimov I.N., Bakanev V.S., Petrov A.B., Krasnoborov D.N. Results of certification tests of the BINUS virtual flow meter for measuring the flow rate of oil wells. *Territory of Neftegaz*, 2022, no. 7–8, pp. 96–102. In Rus.
  25. Varyan R., Haug R.K., Fonnes D.G. Investigation on the suitability of virtual flow metering system as an alternative to the conventional physical flow meter. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Bali, Indonesia, 2015. pp. 1–12.
  26. Amin A. Evaluation of commercially available virtual flow meters (VFMs). *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, USA, 2015. pp. 1–26.
  27. Hotvedt M., Grimstad B., Imslund L. Developing a hybrid data-driven, mechanistic virtual flow meter—a case study. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 11692–11697.
  28. Bello O., Ade-Jacob S., Yuan K. Development of hybrid intelligent system for virtual flow metering in production wells. *SPE Intelligent Energy Conference & Exhibition*. Utrecht, The Netherlands, 2014. pp. 1–8.
  29. Mukherjee H., Brill J.P. *Multiphase flow in wells* Richardson, Society of Petroleum Engineers of AIME, 1999. 149 p.
  30. Vogel J.V. Inflow performance relationships for solution-gas drive wells. *Journal of petroleum technology*, 1968, vol. 20, no. 01, pp. 83–92.
  31. Adeyemi T.S., Rufus D.O. Analytical development of an improved Inflow Performance Relationship (IPR) model for solution gas drive reservoirs. *Journal of Human, Earth, and Future*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 125–135.
  32. Hagedorn A.R., Brown K.E. Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small-diameter vertical conduits. *Journal of Petroleum Technology*, 1965, vol. 17, no. 04, pp. 475–484.
  33. Cox S.A. Errors introduced by multiphase flow correlations on production analysis. *SPE annual Technical Conference*. San Antonio, Texas, USA, 2006. pp. 1–11.
  34. Ivanovskiy V.N., Pekin S.S., Yangulov P.L. Influence of viscous liquid on the performance of submersible electric centrifugal pumps. *Territory of Neftegaz*, 2012, no. 9, pp. 48–55. In Rus.
  35. Petrochenkov A., Ilyushin P., Mishurinskikh S., Kozlov A. Development of a method for improving the energy efficiency of oil production with an electrical submersible pump. *Inventions*, 2023, vol. 8 (1), pp. 29.
  36. Lyakhovskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 7, pp. 2409.
  37. Ivanovskiy V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. *Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefi* [Downhole pumping units for oil production]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2002. 824 p.
  38. Guo B., Lyons W.C., Ghalambor A. *Petroleum production engineering. A computer-assisted approach*. Houston, Gulf Professional Publ., 2007. 287 p.
  39. Boyan G., Ghalambor A. *Natural gas engineering handbook*. Houston, Gulf Professional Publ., 2014. 472 p.

Received: 23 December 2022.

Reviewed: 28 February 2023.

#### Information about the authors

**Pavel Yu. Ilyushin**, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Kirill A. Vyatkin**, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University.

**Anton V. Kozlov**, engineer, Perm National Research Polytechnic University.

**Daniel V. Andreev**, research assistant, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 622.692.4.053

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ КАНАВОЧНОМУ ИЗНОСУ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Султанмагомедов Тимур Султанмагомедович<sup>1</sup>,  
tsultanmaga@gmail.com

Халиков Тагир Магомедович<sup>1</sup>,  
tagirhalikov33@mail.ru

Бахтизин Рамиль Назифович<sup>1</sup>,  
rektor@rusoil.net

Султанмагомедов Султанмагомед Магомедтагирович<sup>1</sup>,  
tt2010@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность** исследования продиктована устареванием используемых промышленных трубопроводов, а значит, необходимостью улучшения качества полевых и камеральных работ по их диагностике и экспертизе промышленной безопасности. В работе рассмотрена возможность применения численного анализа напряженно-деформированного состояния трубопровода, подверженного канавочному износу, с использованием метода конечных элементов. С этой целью создается модель трубопровода с дефектом, рассматривается образование трещины. Рассмотрены плоская и объемная постановки задач, проведен анализ имеющихся исследований.

**Целью** исследования является изучение возможности применения метода конечных элементов для моделирования развития дефектов на трубопроводах. Для повсеместного внедрения метода конечных элементов для камеральной обработки при проведении экспертизы промышленной безопасности нужно обосновать необходимость его применения. Для этого рассмотрена задача определения напряженно-деформированного состояния трубопровода с канавочным износом, с последующим верифицированием результатов.

**Объекты:** анализ методом конечных элементов промышленных трубопроводов, подверженных дефектам потери металла.

**Методы:** математическое моделирование, экспериментальные методы, методы теоретической механики.

**Результаты.** Выполнен механический теоретический расчет напряжений в сечении трубопровода, подверженного ручейковой коррозии; результаты расчета сопоставлены с результатами экспериментов других авторов. По результатам расчетов, полученным на теоретической модели, предложена методика оценки технического состояния трубопровода с ручейковой коррозией, заключающаяся во внесении трещины в исходную геометрию в местах с критическими напряжениями и последующем анализе конструкции. Выполнен механический теоретический расчет напряжений, возникающих в сечении дефектного участка трубопровода при проведении его профилактического поворота.

### Ключевые слова:

ручейковая коррозия, канавочный износ, метод конечных элементов, промышленный трубопровод, оценка технического состояния, экспертиза промышленной безопасности, напряженно-деформированное состояние, концентрация напряжений.

### Введение

Промысловые трубопроводы получили широкое распространение в нефтегазовой отрасли. Они применяются как при транспорте от мест добычи до установок переработки, так и для подачи продукта на другой вид транспорта. Ввиду повышенной агрессивности перекачиваемой по данным трубопроводам среды и сложных условий эксплуатации (продукт с большим количеством примесей, высокое число циклов эксплуатации, т. е. испытание большего по сравнению с магистральными трубопроводами блоков эксплуатации) промышленные трубопроводы подвержены ускоренному устареванию. Накопление критического числа дефектов может приводить к авариям, которые ведут к возникновению экологических и экономических издержек. Обеспечение безопасности эксплуатации промышленных трубопроводов – ключевая задача для любой эксплуатирующей организации.

На рис. 1 приведена статистика по отказам промышленных трубопроводов и трубопроводов системы поддержания пластового давления (ППД) [1, 2]. Согласно статистике, наиболее частой причиной отказа промышленных трубопроводов является внутренняя коррозия. В последние годы произошло перераспределение причин отказа – увеличилось количество отказов, вызванных действием наружной коррозии.

Самым распространенным видом дефектов промышленных трубопроводов является потеря металла. Опаснейшим дефектом, согласно статистике аварий, можно считать «ручейковую» (канавочную) коррозию внутренней поверхности стенки металла. Ее возникновение объясняется недостаточной степенью очистки перекачиваемого продукта, а следовательно, увеличенным электро-механохимическим воздействием [3]. Твердые частицы (преимущественно сульфид железа и сероводород [4]), оседая под действием силы тяжести, нарушают железо-карбонатно-сульфидную пленку, ко-

торая формируется на внутренней поверхности трубопровода и защищает его от коррозии, в нижней образующей цилиндрической поверхности. На поверхности конструкции, в местах с нарушенным пленочным по-

крытием, происходит образование макрогальванической пары. В данном случае внутренняя поверхность с нарушенным покрытием является анодом, за счет чего происходит ее разрушение.

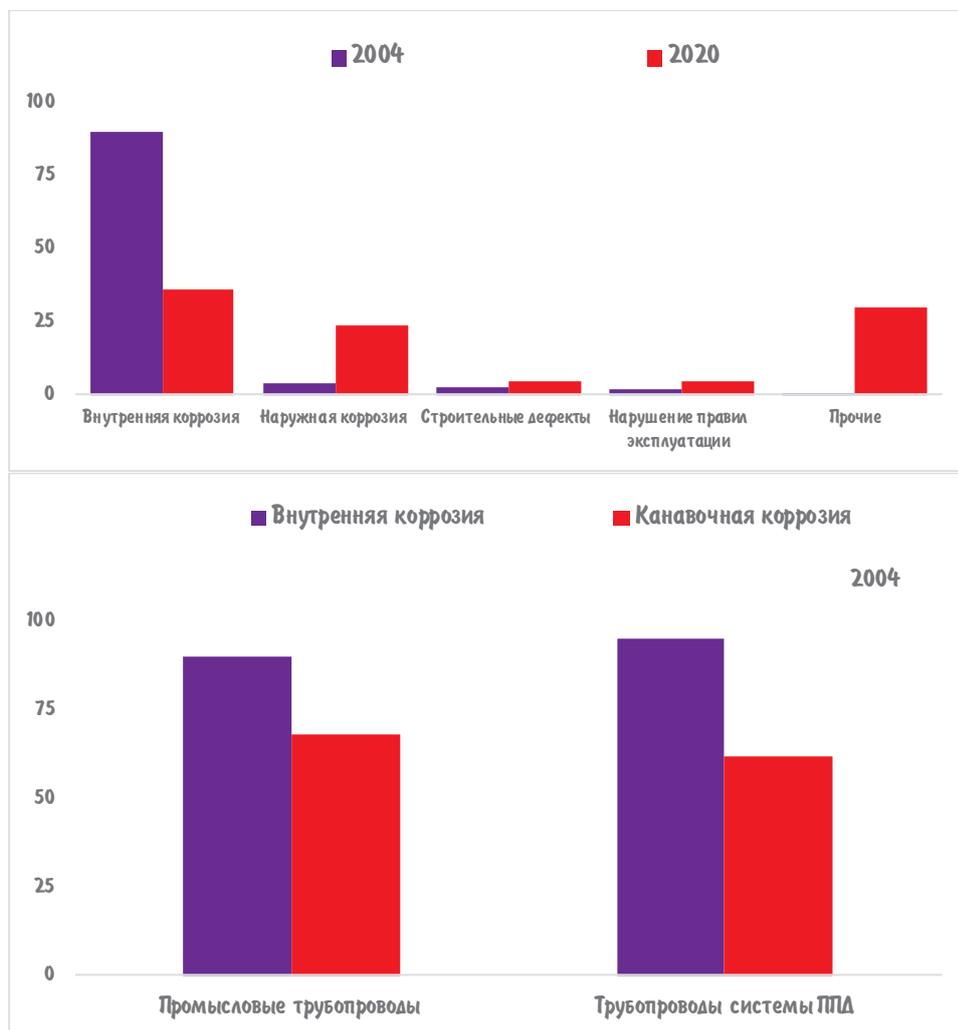


Рис. 1. Причины отказа промышленных трубопроводов [1, 2]

Fig. 1. Reasons for failure of field pipelines [1, 2]

Наибольший вклад в решение проблемы канавочного износа промышленных трубопроводов внесли: И.Г. Абдуллин, С.М. Султанмагомедов, А.А. Гоник, Д.В. Поподько, Г.Г. Попов, П.В. Бурков и др. [1, 3–6].

В работах приведенных выше авторов широко рассмотрена изучаемая проблема с точки зрения правил классической механики. На данный момент существуют инструменты, позволяющие производить более подробный анализ дефекта, получая наглядное представление о поле распределения механических напряжений исследуемого объекта. Одним из таких инструментов для решения задач механики деформируемого твердого тела является численное моделирование, а именно анализ методом конечных элементов.

Исследования канавочного износа методом конечных элементов проводились Д.В. Поподько в [5]. На данный момент благодаря увеличению вычислительных мощностей разработанная модель может быть доработана и усовершенствована для анализа

объемной конструкции и прогнозирования роста трещин. Превышение предела прочности в опорных узлах дефекта на практике приводит к образованию трещин и их последующему ускоренному росту, вплоть до разрушения трубопровода.

В [6] доказана зависимость между перераспределением эквивалентных растягивающих напряжений и развитием ручейковой коррозии. Также предложен метод лабораторных испытаний сталей на способность противостоять данному виду коррозии с целью определения наиболее стойких.

Численное моделирование ручейковой коррозии проведено в [7]. Полученные в ходе компьютерного моделирования процесса результаты следует применять с осторожностью ввиду несоблюдения стандартов расчета тонкостенных оболочек. Согласно пункту 5.3.1 ГОСТ Р 57700.10-2018 исследование тонкостенных оболочек допустимо выполнять лишь при создании сетки конечных элементов конструкции не менее трех по толщине.

Метод конечных элементов представляет собой способ численного решения дифференциальных и интегральных уравнений и применяется для решения прикладных задач физики, в том числе задач механики твердого деформируемого тела [8].

Применимость метода конечных элементов для решения задач, возникающих при проведении экспертизы промышленной безопасности, доказана рядом исследований [9–19].

В частности, обоснованы перспективы применения расширенного метода конечных элементов (Extended Finite Element Method – XFEM) для прогнозирования отказов трубопровода с начальными отклонениями и без них [10].

В [16] достоверность результатов расчета на усталостную долговечность, выполненного в программном комплексе Ansys, подтверждена с помощью моделирования Т-образных стальных соединений на морской нефтегазовой платформе. Авторы утверждают, что подобный метод анализа обеспечивает большой запас по прочности и поэтому его применение в инженерных изысканиях с точки зрения механики усталостного разрушения безопасно и обосновано.

В [19] предложен способ моделирования развития трещины с помощью клеточных структур методом конечных элементов, который показал хорошую сходимость с натурным экспериментом.

#### Цели и задачи

Целью исследования является определение степени применимости метода конечных элементов при проведении работ по оценке технического состояния действующих трубопроводов с дефектами на примере трубопровода, подверженного ручейковой коррозии.

Задачи:

- оценка текущего состояния вопроса использования метода конечных элементов при проведении экспертизы промышленной безопасности нефтегазовых объектов;
- прочностной анализ трубопровода, подверженного ручейковой коррозии, в ПО Ansys с учетом пластических деформаций;
- сравнение результатов предыдущих исследований с проведенным механическим расчетом дефектных участков с учетом возможного роста трещин.
- моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при однократном повороте трубопровода вокруг оси в программном комплексе Ansys.

#### Методы

В исследовании рассматривались три типа канавочного износа трубопроводов: овальный, серповидный и шпоночный (рис. 2) [5]. На практике определение типа коррозионного дефекта возможно различными методами неразрушающего контроля, наиболее рациональным является применение ультразвукового контроля.

Конечно-элементная модель выполнена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.10-2018, вид разбиения на подобласти вблизи дефекта представлен на рис. 3.

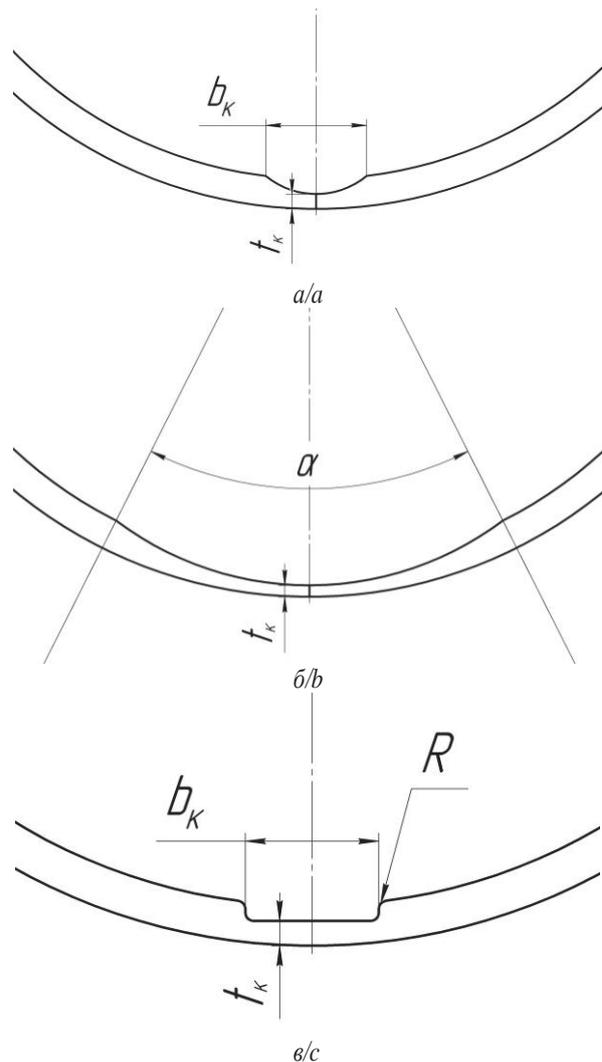
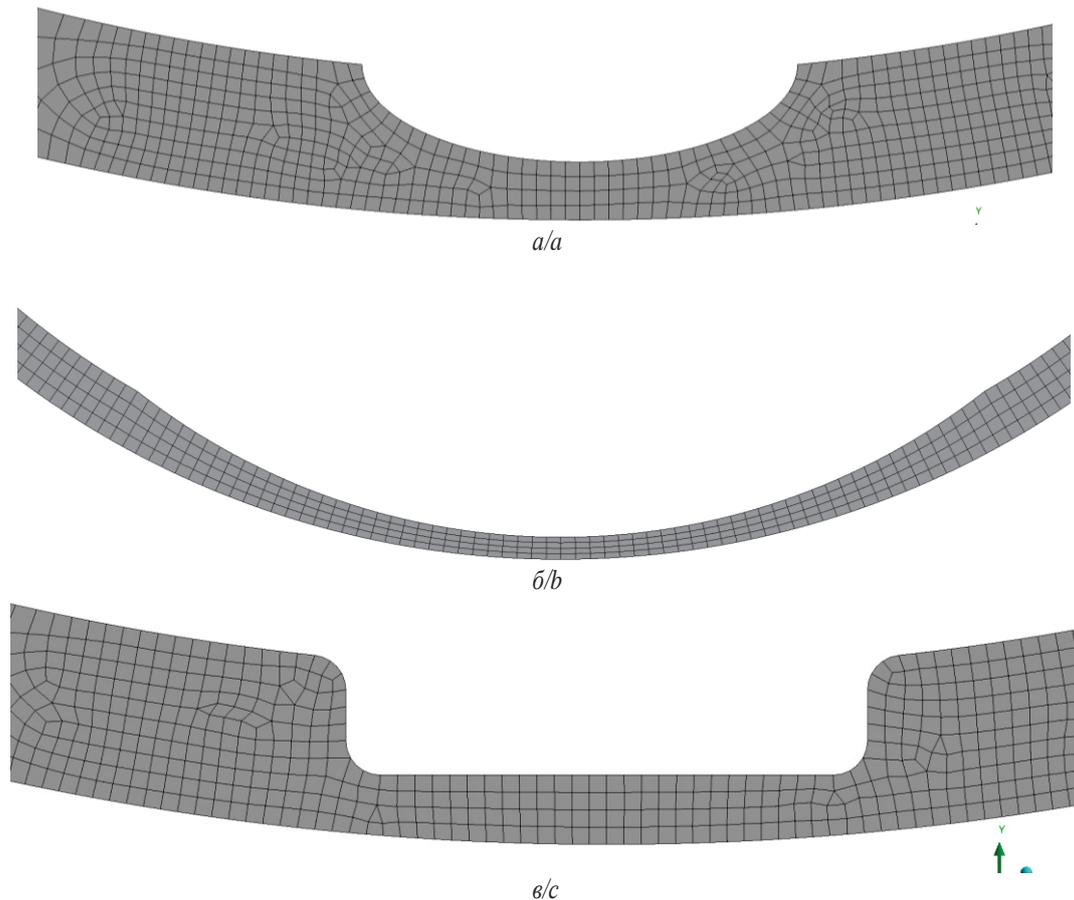


Рис. 2. Типы канавочного износа промышленных трубопроводов: а) овальная коррозия; б) серповидная коррозия; в) шпоночная коррозия

Fig. 2. Types of groove wear of field pipelines: a) oval corrosion; b) sickle-shaped corrosion; c) keyway corrosion

Сечение трубопровода разбито на четырехугольные конечные элементы размером 7 мм в длину и 2,5 мм в ширину (четыре элемента в толщину для тонкостенного элемента). Для получения более точных результатов распределения напряжений вблизи дефекта для овальной и шпоночной коррозии размер конечного элемента в непосредственной близости области износа (область уточнения принята равной двойной длине дефекта) искусственно уменьшен до значения 1 мм.

Наиболее сложной конечно-элементной моделью является модель со шпоночным типом дефекта. Локальное изменение геометрии в узлах дефекта способно провоцировать появление эффекта сингулярности напряжений (сингулярность напряжений – это физически нереалистичные высокие напряжения, получаемые в связи с используемой в методе конечных элементов дискретизацией расчетной модели). Во избежание появления такого эффекта в узлах расчетной модели нанесены скругления с радиусом 2 мм.



**Рис. 3.** Конечно-элементная модель сечения трубопровода с дефектом: а) овальная коррозия; б) серповидная коррозия; в) шпоночная коррозия

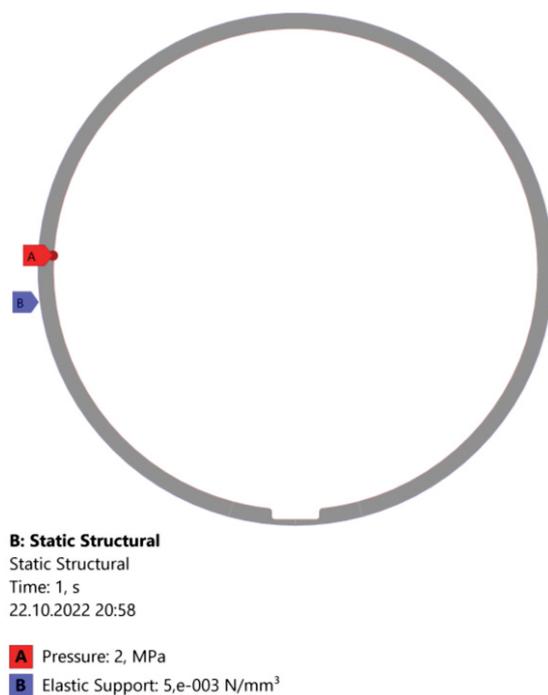
**Fig. 3.** Finite element model of a pipeline section with a defect: a) oval corrosion; b) sickle-shaped corrosion; c) keyway corrosion

Расчет канавочной коррозии выполнен для подземного участка трубопровода с наружным диаметром  $D_{\text{н}}=325$  мм и толщиной стенки  $t=10$  мм. Для моделирования поведения грунта в граничных условиях применяется упругая опора «Elastic Support», что является эквивалентом упругого грунта с коэффициентом постели на сжатие (коэффициент, равный отношению давления, приложенного к какой-либо точке поверхности основания, к осадке, возникающей от этого давления в этой же точке, аналог коэффициента жесткости пружины), равным  $5 \text{ МН/м}^3$ . Рабочее давление, действующее на внутреннюю поверхность трубопровода, принималось равным  $P_{\text{раб}}=2 \text{ МПа}$  (рис. 4).

#### Результаты

В результате численного моделирования дефектных трубопроводов получены эпюры распределения напряжений и деформаций (рис. 5). Проведено численное моделирование трубопроводов с различными видами дефектов потери металла (овальная коррозия, серповидная коррозия, шпоночная коррозия).

С точки зрения распределения напряжений при одинаковой остаточной толщине наиболее опасным видом канавочной коррозии является шпоночная коррозия. Максимальные напряжения выявлены в местах утонения металла (таблица).



**Рис. 4.** Граничные условия с одной канавкой  
**Fig. 4.** Boundary conditions with a groove

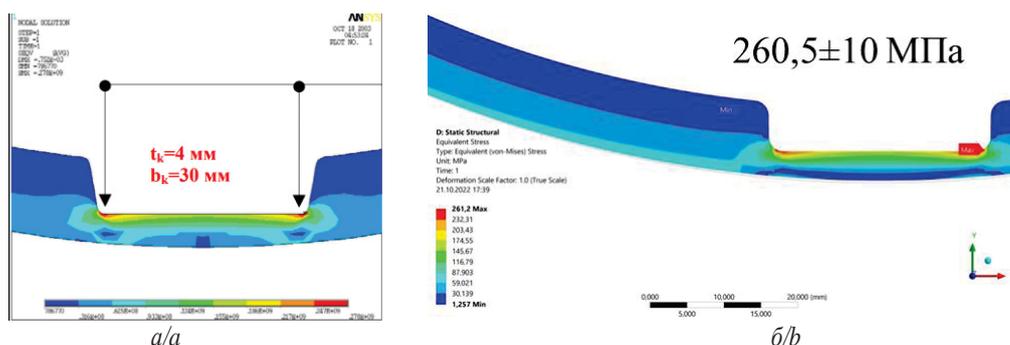


Рис. 5. а) результаты моделирования в [5]; б) результаты моделирования ипоночной коррозии авторами  
 Fig. 5. a) results of modeling in [5]; b) results of modeling keyway corrosion by the authors

Таблица. Результат расчета максимальных напряжений в трубопроводе, МПа

Table. Result of calculating the maximum stresses in the pipeline, МPa

Тип дефекта Type of defect	Серповидная коррозия Sickle-shaped corrosion			Овальная коррозия Oval corrosion			Шпоночная коррозия Keyway corrosion		
	Центральный угол канавки, град Central angle of the groove, deg			Ширина канавки, мм Groove width, mm					
	30	45	60	20	25	30	20	25	30
Результаты моделирования в [5] Simulation results in [5]	200,00	172,00	152,00	276,00	278,00	260,00	277,00	276,00	275,00
Результаты моделирования кор- розии авторами Results of corrosion modeling by the authors	207,63	174,53	153,96	259,13	267,60	257,56	257,42	264,59	261,19
Расхождение результатов, % Divergence of results, %	3,82	1,47	1,29	6,11	3,74	0,94	7,07	4,13	5,02

Полученные результаты могут быть использованы лишь в узком диапазоне условий. Погрешность вычисления, возникающая в результате влияния размера конечного элемента, проанализирована на сходи-

мость (рис. 6). Предложенная методика расчета наиболее точно описывает поведение трубопроводов с серповидным и овальным типом коррозионных дефектов ввиду меньшей погрешности результатов.

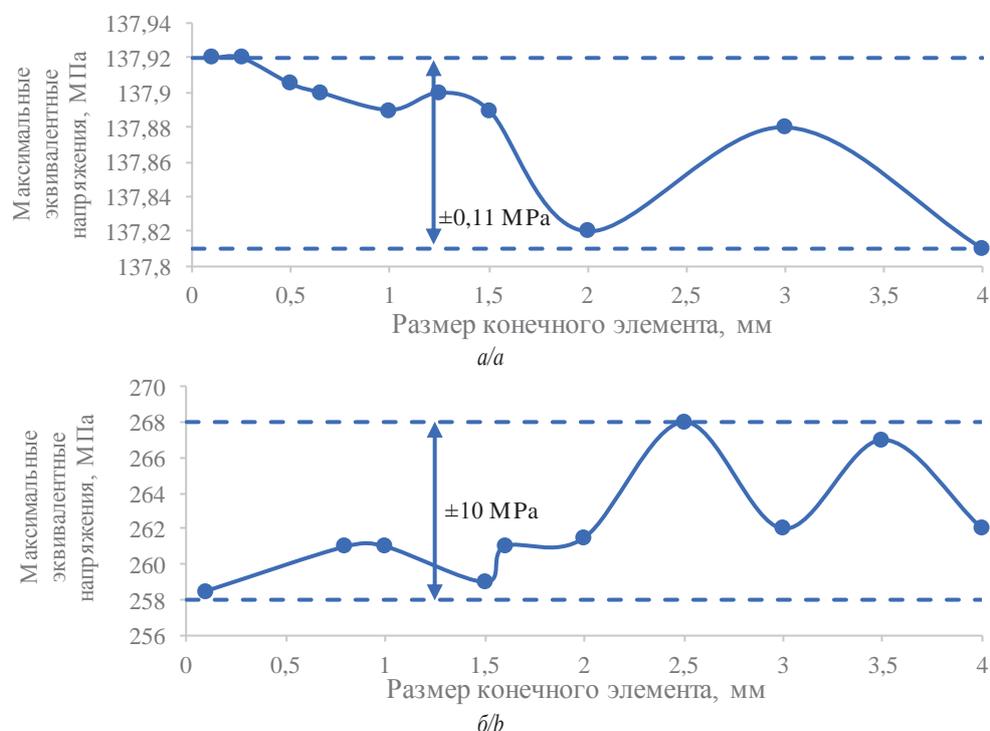


Рис. 6. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от размера конечного элемента: а) серповидная коррозия; б) ипоночная коррозия

Fig. 6. Dependence of the maximum equivalent stresses on the size of the finite element: a) sickle-shaped corrosion; b) keyway corrosion

Изучение зависимости максимальных эквивалентных напряжений от размера конечного элемента в рамках одного эксперимента показало, что генерируемая погрешность не превышает 1 % уже при задании линейного размера элемента в 1 мм для серповидного и овального типа дефектов.

Для шпоночного коррозионного разрушения зависимость максимальных эквивалентных напряжений от размера конечного элемента не показывает однозначной сходимости. На основании проведенного анализа в качестве погрешности вычислений принята величина размаха расчетных напряжений равная 10 МПа.

В области канавки, в которой ожидаются максимальные напряжения, искусственно создается трещина с целью исследования последующего развития лавинообразного вскрытия канавки. Такой метод используется для прогноза дальнейшего износа трубопровода, вплоть до его разрушения.

Для моделирования механики разрушения в программном комплексе Ansys Workbench также возможно применение других методов задания исходной геометрии трещины. Стоит отметить необходимость размещения локальной системы координат каждой из трещин в ее основании, ориентированной таким образом, чтобы ось X системы была направлена вдоль глубины распространения фронта дефекта.

«Semi-Elliptical Crack» – полуэллиптическая трещина, создаваемая на уровне конечных элементов, без изменения CAD-геометрии конструкции. Создание трещины осуществляется заданием всех характерных размеров эллиптической формы в окне ее свойств. Данный способ создания трещины поддерживает разбиение исходной конструкции только тетра-элементами. Сама же трещина может быть разбита как тетра-, так и гекса-элементами.

«Arbitrary Crack» – способ задания трещины произвольной формы. Трещина создается на основе тела – поверхности, моделируемой на этапе создания

CAD-геометрии. Данная трещина поддерживает только сетку из тетра-элементов.

«Pre-Meshed Crack» – также создает трещину произвольной формы, но на основе подготовленной сетки конечных элементов. Данный способ удобен в случаях импорта сетки конечных элементов из сторонних программных пакетов.

«Pre-Meshed Crack» – единственный возможный способ анализа трещин в плоской постановке.

Смоделировано дальнейшее развитие трещины методом «Arbitrary Crack» способом задания исходной трещины для ее дальнейшего анализа. В процессе расчета происходит формирование динамической сетки конечных элементов. На каждом этапе расчета в исследуемой области происходит формирование новой сетки конечных элементов, что позволяет производить расчет с учетом развития трещины. Решение подобной задачи невозможно в плоской постановке, поэтому для моделирования процесса принята модель с толщиной 5 мм.

Исходная трещина размещена в основании дефекта потери металла, в месте, где напряжения превышают предел прочности металла. Глубина исходной трещины принята равной 0,5 мм. Так как решение задачи разрушения невозможно провести в одну итерацию, параметры подшага приняты в соответствии со стандартными значениями, рекомендуемыми разработчиками программного обеспечения.

Результаты моделирования представлены на рис. 7. Области, в которых напряжения превышают предел прочности исследуемого материала, на рисунке окрашены красным цветом; области с превышением предела текучести, означающие переход в зону пластических деформаций, показаны желтым цветом. Максимальные напряжения наблюдаются у пика трещины, что провоцирует ее дальнейшее развитие вплоть до разрушения трубопровода.

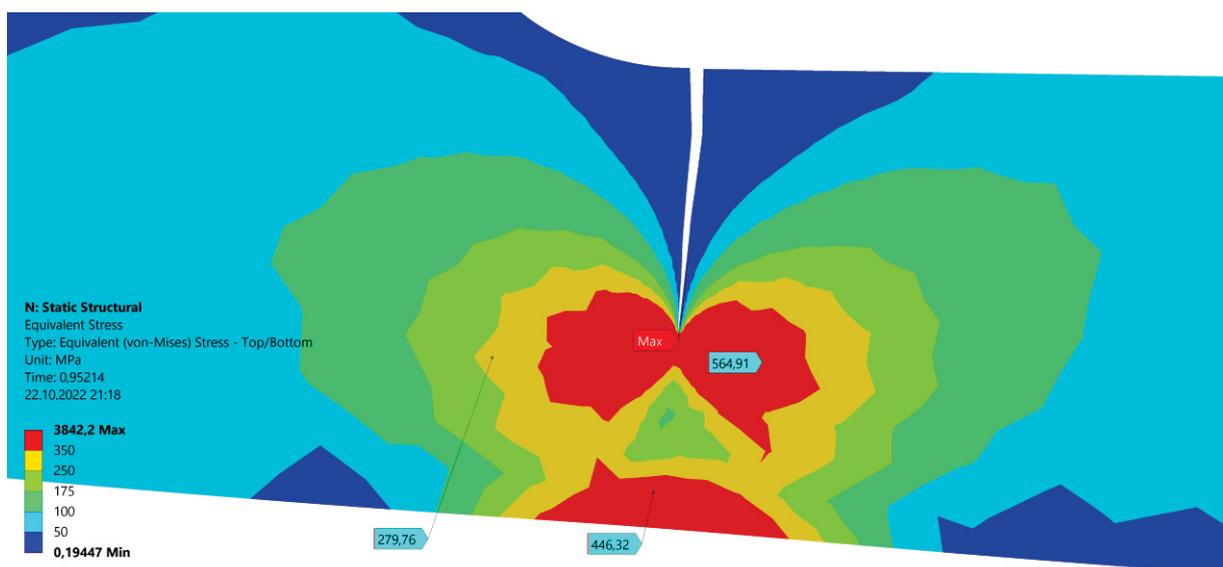


Рис. 7. Напряженное состояние при раскрытии трещины

Fig. 7. Stress state during crack opening

В работе [1] предлагается применение метода профилактического поворота трубопроводов на участках, подверженных «канавочному» разрушению, позволяющего увеличить срок их эксплуатации за счет обеспечения более равномерного износа внутренней поверхности стенки труб. Метод обеспечения безопасной эксплуатации заключается в повороте трубопровода относительно его продольной оси на угол  $\varphi$ , который определяется исходя из расчета прочности при параметризации линейных размеров коррозии.

Порядок профилактического поворота промышленного подземного трубопровода следующий. На пораженных участках трубопровода разрабатываются шурфы в целях размещения на поверхности трубопровода механических захватных устройств (МЗУ), которые будут передавать крутящий момент от силового механизма к трубопроводу за счет возникающих сил трения между ними. Расчетами определяют необходимый начальный угол поворота рассматриваемого сечения трубопровода, увеличивая его на 15...20%. С помощью приложения нагрузки от силовых механизмов (тракторы, трубоукладчики и т. д.) к МЗУ происходит поворот участка трубопровода определенной длины. Эта длина определяется на основе инженерных изысканий и задает расстояние до следующего шурфа и следующего МЗУ. Выполнение профилактического поворота участка трубопровода возможно как одновременно с применением нескольких МЗУ, так и

последовательно с установкой одного устройства в различных сечениях участка.

Таким образом, имеющийся дефект смещается из зоны повышенного износа, а значит, интенсивность его дальнейшего развития замедляется.

Все параметры, определяющие проведение профилактических работ, должны быть определены расчетами из условий безопасности эксплуатации трубопровода. В том числе в работе предложена методика определения рациональной длины размещения МЗУ, которая решает сразу несколько проблем, связанных с поворотом участка: минимизирует разницу между углами поворота сечений, допускает проведение повторных профилактических работ в случае необходимости, снижает образование остаточных деформаций конструкции, уменьшает угол возврата под действием упругих деформаций. Размещение МЗУ по длине пораженного участка производится на основании расчета по минимизации остаточных деформаций. Исходными данными для такого расчета является информация, полученная в результате проведения неразрушающего контроля на всем участке предполагаемого износа.

На данный момент благодаря увеличению вычислительных мощностей разработанная методика может быть исследована с помощью анализа методом конечных элементов. Схема к определению локальной нагрузки на трубопровод от механического захватного устройства представлена на рис. 8, а.

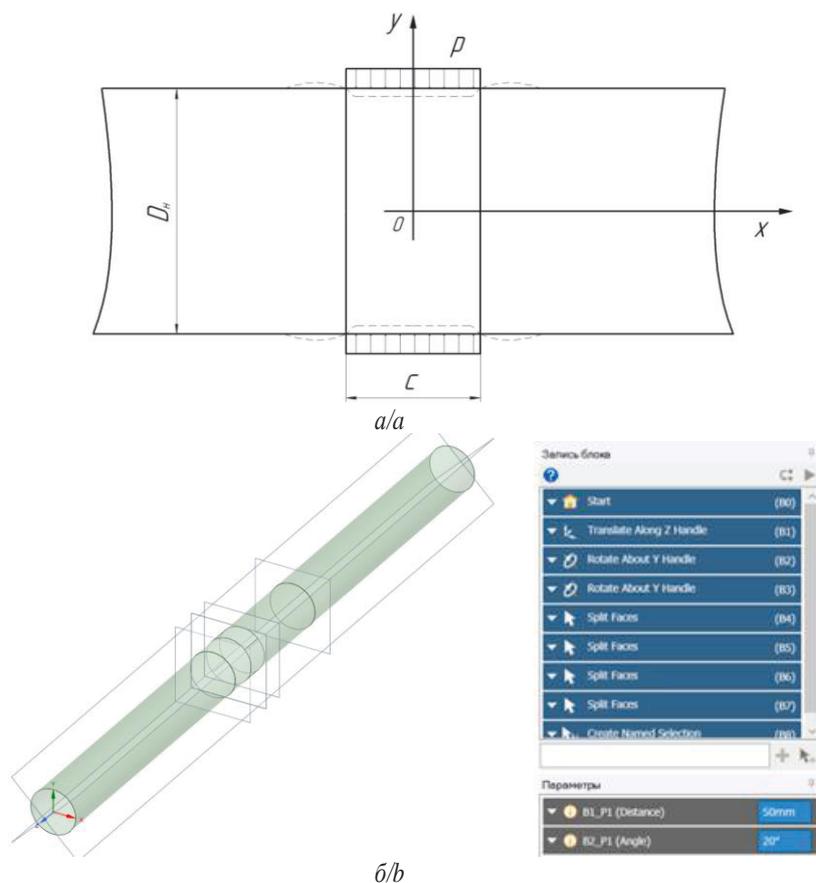


Рис. 8. а) схема к определению воздействия локальной нагрузки на трубопровод [1]; б) расчетная параметрическая модель

Fig. 8. a) scheme for determining the impact of local load on the pipeline [1]; b) calculated parametric model

В программе геометрического моделирования SpaceClaim создана параметрическая модель (рис. 8, б), позволяющая производить расчет локальной нагрузки на трубопровод. Особенностью данной модели является возможность параметрического изменения геометрии. Путем программирования процесса построения добавлена возможность изменения ширины и угла приложения нагрузки. Такая модель позволяет анализировать зависимость возникающих максимальных напряжений как от ширины захватного устройства, так и от угла приложения нагрузки.

Расчет напряжений от действия механического захватного устройства производился в Shell-постановке. Для моделирования поведения грунта в граничных условиях применяется упругая опора, что является эквивалентом упругого грунта с коэффициентом постели на сжатие равным  $5 \text{ МН/см}^3$ . В области прилегания предполагаемого устройства распределено усилие (рис. 9). Параметрическая модель позволила изменять параметры: ширины МЗУ, угла обхвата и давления устройства на часть поверхности трубопровода.

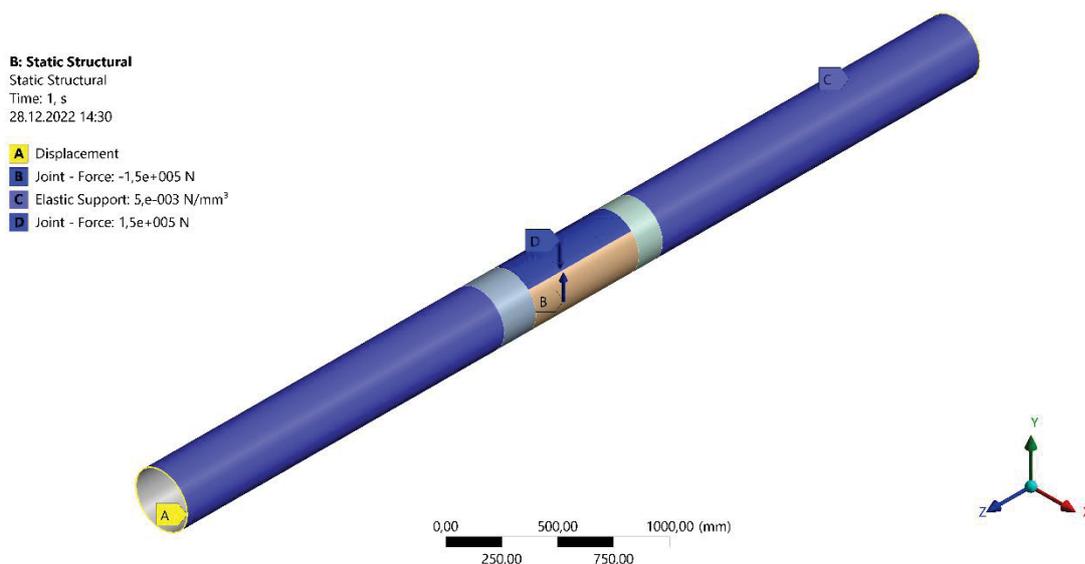


Рис. 9. Граничные условия при моделировании напряжений от захватывающего устройства  
 Fig. 9. Boundary conditions in simulation of stresses from a gripping device

Результаты моделирования воздействия МЗУ представлены на рис. 10. Созданная параметрическая модель позволяет анализировать чувствительность максимальных эквивалентных напряжений к изменению геометрических параметров захватывающего устройства. При исследовании влияния параметров МЗУ на возникновение максимальных эквивалентных

напряжений сила прилагаемой нагрузки находилась в диапазоне 150...200 кН, длина механического захватного устройства – в диапазоне 165...650 мм, угол обхвата устройства – в диапазоне 90...130°. Зависимости нагрузки и длины взяты исходя из геометрических и силовых характеристик захватывающего устройства, предложенного в [1].

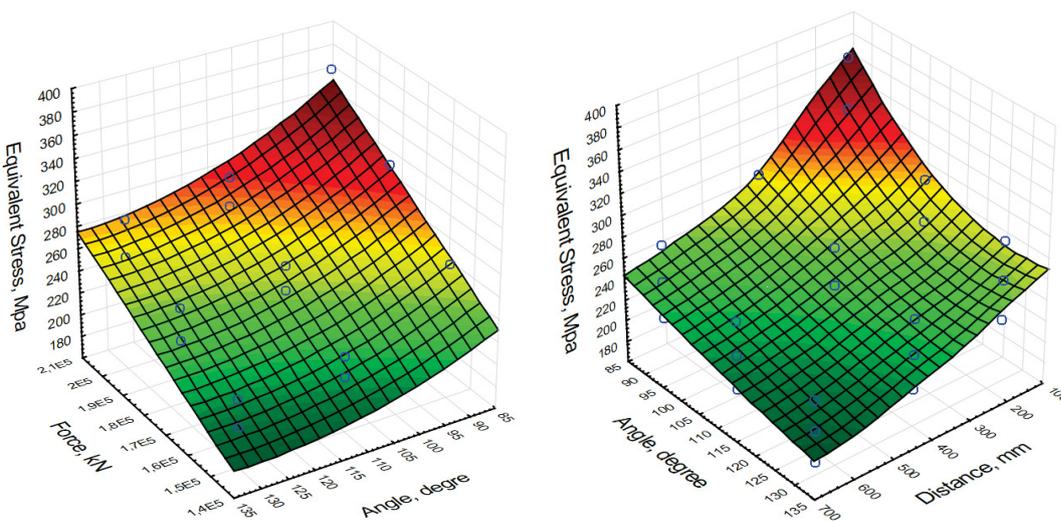


Рис. 10. Результаты моделирования воздействия МЗУ  
 Fig. 10. Results of modeling the impact of a mechanical gripping device

Для построения поверхностей распределения напряжений использован метод сплайн интерполяции данных. Графические зависимости построены по результатам проведения 27 численных экспериментов.

Увеличение как длины механического захватного устройства, так и ширины его обхвата пропорционально уменьшает возникающие в трубопроводе эквивалентные напряжения.

Полученные результаты и предложенная методика могут быть применимы, например, при анализе НДС ремонтируемого трубопровода, усиленного бандажом [20], или моделировании проведения капитального ремонта магистральных трубопроводов [21].

#### Обсуждение

Предложена новая методика оценки технического состояния трубопровода с речевой коррозией, заключающаяся во внесении трещины в исходную геометрию в местах с критическими напряжениями. Применение метода конечных элементов при проведении экспертизы промышленной безопасности нефтегазовых объектов находится на стадии развития. Ряд исследований доказал эффективность и безопасность применения данного метода; нормативно-техническая документация находится в разработке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Султанмагомедов С.М. Обеспечение долговечности и безопасной эксплуатации промышленных трубопроводов, подверженных канавочному износу: автореф. дис. ... д-ра наук. – Уфа, 2002. – 224 с.
2. Ермаков А.Е., Филипов Д.А. Анализ причин отказов промышленных трубопроводов // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. – № 5 (39). – С. 333–335. URL: <https://meridian-journal.ru/site/article?id=2950> (дата обращения 05.12.2022).
3. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем: диагностика и прогнозирование долговечности. – Уфа: Изд-во «Гилем», 1997. – 177 с.
4. Гоник А.А. О локальной внутренней коррозии нефтегазопроводов на месторождениях Западной Сибири и возможности ее устранения // Защита металлов. – 2005. – Т. 41. – № 5. – С. 523–527.
5. Поподько Д.В. Оценка безопасной эксплуатации оболочек с канавочным износом методом конечных элементов: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2004. – 147 с.
6. Попов Г.Г. Разработка метода защиты промышленных нефтепроводов от речевой коррозии подбором коррозионно-стойких сталей: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2020. – 105 с.
7. Исследование напряженно-деформированного состояния промышленных трубопроводов, подвергшихся воздействию речевой коррозии / П.В. Бурков, В.П. Бурков, Д.С. Фатьянов, В.Ю. Тимофеев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 3 (127). – С. 5–13.
8. Gallagher R.H. Finite element analysis: fundamentals. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975. – 420 p.
9. Некоторые аспекты экспертизы технического состояния металлургического оборудования / И.И. Карпунин, Н.А. Галов, А.М. Выговский, Н.К. Корнев // Черная Металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2016. – № 3. – С. 90–95.
10. Systematic literature review of the application of extended finite element method in failure prediction of pipelines / M.M. Shahzamanian, M. Lin, M. Kainat, N. Yoosef-Ghods, S. Adeeb // Journal of Pipeline Science and Engineering. – 2021. – V. 1. – P. 241–251.
11. Buckling analysis of deepwater pipelines by vector form intrinsic finite element method / L. Zhen-Mian, Y. Yang, Y. Jian-Xing, Z. Yu, Z. Xiao-Ming, Z. Ming-Ren // Engineering Mechanics. – 2021. – V. 38 (4). – P. 247–256.

#### Выводы

1. Проведенный прочностной анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода, подверженного речевой коррозии в ПО Ansys, показал хорошую сходимость с экспериментальными данными и результатами других авторов.
2. При нагружении трубопровода с канавочным износом внутренним давлением происходит «втягивание» стенки в месте износа внутрь трубопровода на малую величину. Данное явление происходит из-за стремления выстроить центры тяжести сечения в одну линию. Такое поведение наблюдается пока на трубопровод действует внутреннее давление. Для верификации полученных в результате проведенного расчета результатов необходимо произвести натурные эксперименты, а также исследовать более широкий спектр дефектов промышленных трубопроводов методом конечных элементов.
3. Моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при однократном захвате трубопровода механическим захватным устройством определило пропорциональную зависимость возникающих напряжений от силы, длины и угла приложения нагрузки.
12. A review of finite element analysis and artificial neural networks as failure prediction tools for corroded pipelines / S.D. Vijaya Kumar, M. Lo Yin Kai, T. Arumugam, S. Karuppanan // Materials. – 2021. – V. 14. – P. 1–15.
13. Prediction of tensile strain capacity for X52 steel pipeline materials using the extended finite element method / N. Elyasi, M. Shahzamanian, M. Lin, L. Westover, Y. Li, M. Kainat, N. Yoosef-Ghods, S. Adeeb // Applied Mechanics. – 2021. – V. 2. – P. 209–225.
14. Failure pressure estimation for an aged and corroded oil and gas pipeline: a finite element study / J.C. Velázquez, N.E. González-Arévalo, M. Díaz-Cruz, A. Cervantes-Tobón, H. Herrera-Hernández, E. Hernández-Sánchez // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2022. – V. 101. – P. 1–25.
15. Stress calculations adopted finite element method of pressure steam pipeline containing defects / Y. Chen, P. Tang, J. Zhong, S. Yan, N. Jin, L. Liu // MATEC Web of Conferences. – 2021. – V. 353. – P. 1–4.
16. Fatigue crack monitoring of t-type joints in steel offshore oil and gas jacket platform / L. Ali, S. Khan, S. Bashmal, N. Iqbal, W. Dai, Y. Bai // Sensors. – 2021. – V. 21. – P. 1–26.
17. Park Y.-I., Cho J.-S., Kim J.-H. Structural integrity assessment of independent type-C cylindrical tanks using finite element analysis: comparative study using stainless steel and aluminum alloy // Metals. – 2021. – V. 11. – P. 1–20.
18. Nahal M. Pipelines reliability analysis under corrosion effect and residual stress // Arabian journal for science and engineering. – 2015. – V. 40. – P. 3273–3283.
19. Nucleation and propagation of stress corrosion cracks: modeling by cellular automata and finite element analysis / K. Gong, M. Wu, X. Liu, G. Liu // Materials Today Communications. – 2022. – V. 33. – P. 17–38.
20. Расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода, усиленного бандажом / Р.Р. Рамазанов, И.Ф. Кантемиров, Д.А. Гулин, И.Ф. Махмудова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 1 (135). – С. 78–88.
21. Азметов Х.А., Шайбаков Б.Р. Определение технологических параметров капитального ремонта магистральных трубопроводов в условиях действия продольного сжимающего усилия в стенке труб // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – № 5 (121). – С. 95–103.

Дата поступления: 09.01.2023 г.  
Дата рецензирования: 23.01.2023 г.

#### **Информация об авторах**

*Султанмагомедов Т.С.*, аспирант, ассистент кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

*Халиков Т.М.*, магистрант кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

*Бахтизин Р.Н.*, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАЕН, академик АН Республики Башкортостан, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

*Султанмагомедов С.М.*, доктор технических наук, академик РАЕН, профессор кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, декан факультета трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 622.692.4.053

## CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PIPELINES SUBJECT TO GROOVE WEAR BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Timur S. Sultanmagomedov<sup>1</sup>,  
tsultanmaga@gmail.com

Tagir M. Khalikov<sup>1</sup>,  
tagirhalikov33@mail.ru

Ramil N. Bakhtizin<sup>1</sup>,  
rektor@rusoil.net

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov<sup>1</sup>,  
tt2010@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**The relevance** of the study is dictated by the obsolescence of the field pipelines used, which means the need to improve the quality of field and desk work on their diagnostics and industrial safety expertise. The paper considers the possibility of applying numerical analysis of the stress-strain state of a pipeline subject to groove wear using the finite element method. For this purpose, a model of a pipeline with a defect is created and the formation of a crack is considered. The flat and volumetric problem statements are considered, the analysis of available studies is carried out.

**The purpose** of the research is to study the possibility of using finite element method to simulate the development of defects in pipelines. For the widespread introduction of finite element method for in-house processing during industrial safety expertise, it is necessary to justify the need for its use. For this purpose, the problem of determining the stress-strain state of a pipeline with groove wear, with subsequent verification of the results, is considered.

**Objects:** finite element analysis of field pipelines subject to metal loss defects.

**Methods:** mathematical modeling, experimental methods, methods of theoretical mechanics.

**Results.** A mechanical theoretical calculation of stresses in the cross section of a pipeline subject to stream corrosion was performed; the calculation results are compared with the results of experiments by other authors. Based on the results of calculations obtained on a theoretical model, a method for assessing the technical condition of a pipeline with rivulet corrosion is proposed, which consists in introducing a crack into the original geometry in places with critical stresses and subsequent analysis of the structure. A mechanical theoretical calculation of stresses arising in the section of a defective section of the pipeline during its preventive rotation is performed.

### Key words:

stream corrosion, groove wear, finite element method, field pipeline, technical condition assessment, industrial safety expertise, stress-strain state, stress concentration.

### REFERENCES

- Sultanmagomedov S.M. *Obespechenie dolgovechnosti i bezopasnoy ekspluatatsii promyslovykh truboprovodov, podverzhennykh kanavochnomu iznosu*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Ensuring the durability and safe operation of industrial pipelines subjected to groove wear. Dr. Diss. Abstract]. Ufa, 2002. 224 p.
- Ermakov A.E., Filipov D.A. Analiz prichin otkazov promyslovykh truboprovodov [Analysis of the causes of failures of field pipelines]. *Nauchny elektronny zhurnal Meridian*, 2020, no. 5 (39), pp. 333–335. Available at: <https://meridian-journal.ru/site/article?id=2950> (accessed 5 December 2022).
- Abdullin I.G., Gareev A.G., Mostovoy A.V. *Korroziyemekhanicheskaya stoykost neftegazovykh truboprovodnykh sistem: diagnostika i prognozirovanie dolgovechnosti* [Corrosion and mechanical resistance of oil and gas pipeline systems: diagnostics and forecasting of durability]. Ufa, Gilem Publ., 1997. 177 p.
- Gonik A.A. O lokalnoy vnutrenney korrozii neftegazoprovodov na mestorozhdeniyakh Zapadnoy Sibiri i vozmozhnosti ee ustraneniya [About local internal corrosion of oil and gas pipelines in the fields of Western Siberia and the possibility of its elimination]. *Zashchita metallov*, 2005, vol. 41, no. 5, pp. 487–490.
- Popodko D.V. *Otsenka bezopasnoy ekspluatatsii obolochek s kanavochnym iznosom metodom konechnykh elementov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Evaluation of the safe operation of shells with groove wear by the finite element method. Cand. Dis. Abstract]. Ufa, 2004. 147 p.
- Popov G. *Razrabotka metoda zashchity promyslovykh nefteprovodov ot rucheykovoy korrozii podborom korroziyestoykikh staley*. Diss. Kand. nauk [Development of a method for protecting field oil pipelines from stream corrosion by selecting corrosion-resistant steels. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2020. 105 p.
- Burkov P.V., Burkov V.P., Fatyanov D.S., Timofeev V.Yu. Studying the stress-strain state of oilfield pipelines exposed to rill corrosion. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2018, vol. 127, no. 3, pp. 5–13. In Rus.
- Gallagher R.H. *Finite element analysis: fundamentals*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall Publ., 1975. 420 p.
- Karpukhin I.I., Galov N.A., Vygovskiy A.M., Kornev N.K. Some aspects of the examination of the engineering status of the metallurgical equipment. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2016, no. 3, pp. 90–95. In Rus.
- Shahzamanian M.M., Lin M., Kainat M., Yoosef-Ghods N., Adeeb S. Systematic literature review of the application of extended finite element method in failure prediction of pipelines. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2021, vol. 1, pp. 241–251.
- Zhen-Mian L., Yang Y., Jian-Xing Y., Yu Z., Xiao-Ming Z., Ming-Ren Z. Buckling analysis of deepwater pipelines by vector form intrinsic finite element method. *Engineering Mechanics*, 2021, vol. 38 (4), pp. 247–256.
- Vijaya Kumar S.D., Lo Yin Kai M., Arumugam T., Karuppanan S. A review of finite element analysis and artificial neural networks as failure pressure prediction tools for corroded pipelines. *Materials*, 2021, vol. 14, pp. 1–15.

13. Elyasi N., Shahzamanian M., Lin M., Westover L., Li Y., Kainat M., Yoosief-Ghodsí N., Adeeb S. Prediction of tensile strain capacity for X52 steel pipeline materials using the extended finite element method. *Applied Mechanics*, 2021, vol. 2, pp. 209–225.
14. Velázquez J.C., González-Arévalo N.E., Díaz-Cruz M., Cervantes-Tobón A., Herrera-Hernández H., Hernández-Sánchez E. Failure pressure estimation for an aged and corroded oil and gas pipeline: a finite element study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, vol. 101, pp. 1–25.
15. Chen Y., Tang P., Zhong J., Yan S., Jin N., Liu L. Stress calculations adopted finite element method of pressure steam pipeline containing defects. *MATEC Web of Conferences*, 2021, vol. 353, pp. 1–4.
16. Ali L., Khan S., Bashmal S., Iqbal N., Dai W., Bai Y. Fatigue crack monitoring of T-type joints in steel offshore oil and gas jacket platform. *Sensors*, 2021, vol. 21, pp. 1–26.
17. Park Y.-I., Cho J.-S., Kim J.-H. Structural integrity assessment of independent type-C cylindrical tanks using finite element analysis: comparative study using stainless steel and aluminum alloy. *Metals*, 2021, vol. 11, pp. 1–20.
18. Nahal M. Pipelines reliability analysis under corrosion effect and residual stress. *Arabian journal for science and engineering*, 2015, vol. 40, pp. 3273–3283.
19. Gong K., Wu M., Liu X., Liu G. Nucleation and propagation of stress corrosion cracks: modeling by cellular automata and finite element analysis. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 33, pp. 17–38.
20. Ramazanov R.R., Kantemirov I.F., Gulín D.A., Makhmudova I.F. Calculation of the stress-strain state of a pipeline reinforced with a bandage. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2022, no. 1 (135), pp. 78–88. In Rus.
21. Azmetov K.A., Shaybakov B.R. Technological parameters determination for trunk pipelines overhaul under conditions of longitudinal compressive force in the pipe wall. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2019, no. 5 (121), pp. 95–103. In Rus.

*Received: 9 January 2023.*  
*Reviewed: 23 January 2023.*

#### Information about the authors

**Timur S. Sultanmagomedov**, postgraduate student, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

**Tagir M. Khalikov**, master student, Ufa State Petroleum Technological University.

**Ramil N. Bakhtizin**, Dr. Sc., Academician of the RANS, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, professor, chief researcher, World-class scientific center «Rational development of liquid hydrocarbon reserves of the planet», Ufa State Petroleum Technological University.

**Sultanmagomed M. Sultanmagomedov**, Dr. Sc., professor, Academician of the RANS, dean of the Pipeline Transport Department, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 624.131

## ОЦЕНКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ ТРАССЫ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ТРУБОПРОВОДА НА МЕЖДУРЕЧЬЕ МАЛХОЙЯХА–ПУР

Филимонов Андрей Алексеевич<sup>1,2</sup>,  
andrey\_filimonoff@list.ru

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

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

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

**Актуальность** работы определена важностью безаварийной эксплуатации объектов трубопроводного транспорта, расположенного в криолитозоне. Проявления опасных инженерно-геологических процессов во время эксплуатации подземного трубопровода могут привести к изменениям системы «многолетнемерзлый грунт – трубопровод», что повлечет за собой возникновение непроектных нагрузок на тело трубопровода, отказы трубопровода и аварии. Требуется проводить анализ активизации и развития на трассе трубопровода опасных геологических процессов для корректной оценки изменений инженерно-геокриологических условий во время эксплуатации трубопровода.

**Целью** является ранжирование участков трассы с развивающимися опасными геологическими процессами и выявление их влияния на условия дальнейшей эксплуатации объекта.

**Методы:** анализ результатов инженерных изысканий по объекту исследования и данных геотехнического мониторинга нефтеконденсатопровода; оценочные методики для проведения районирования участков трассы.

**Результаты.** На первом этапе исследования были собраны и проанализированы данные по трассе. Трасса разбита на восемь ключевых участков, характеризующихся определенными технологическими параметрами трубопровода: узлы запорной арматуры, переходы с байпасными линиями и др. Определены критерии для оценки опасных геологических процессов балльным методом, и проведена оценка по ключевым участкам. На втором этапе была определена модель районирования, обозначены граничные критерии удельного веса выявленных опасных геологических процессов для каждого участка трассы, обозначены таксоны, проранжированы участки трассы в соответствии с моделью районирования. Идентифицированы наиболее уязвимые участки трассы нефтеконденсатопровода с точки зрения проявления геологических процессов.

### Ключевые слова:

районирование, инженерно-геологические условия, опасные геологические процессы, подземный трубопровод, многолетнемерзлые грунты.

### Введение

Строительство подземного трубопровода в криолитозоне сопряжено с преодолением разнообразных инженерно-геокриологических обстановок. Система «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт» является многокомпонентной, к ней предъявляются повышенные требования как на этапе проектирования: выполнение прогнозных теплотехнических расчетов состояния грунтов, корректного подбора защитных мероприятий, оценка деформаций грунтов, а также деформаций тела трубопровода, так и на этапах строительства и эксплуатации. Инженерно-геологическое районирование территории трассы при проектировании позволяет обосновать защитные мероприятия. В период эксплуатации трубопровода повторное инженерно-геологическое районирование трассы, учитывающее активизацию опасных геологических процессов при техногенном воздействии, позволяет оптимизировать систему геотехнического мониторинга для безопасного и безаварийного функционирования трубопровода.

Целью данного исследования является комплексная оценка инженерно-геокриологических условий территории трассы трубопровода на этапе эксплуатации.

В качестве объекта исследования выбрана трасса нефтеконденсатопровода с установки подготовки нефти (УПН) Валанжинской залежи до приемосдаточного пункта (ПСП) Заполярное на междуречье Малхойяха–Пур (рис. 1). В задачи исследования входили: оценка инженерно-геологических условий трассы; идентификация участков с активизировавшимися во время эксплуатации опасными геологическими процессами; оценка влияния данных процессов на безопасную эксплуатацию нефтеконденсатопровода.

### Методика исследования

Исследование проведено в 2022 г. в отделении геологии ТПУ и включало в себя:

- анализ материалов проектно-сметной документации;
- анализ материалов инженерно-геологических изысканий участков трассы, анализ материалов геотехнического мониторинга объекта исследования;
- установление принципов и методики районирования;
- оценку и районирование территории по степени сложности инженерно-геологических условий.

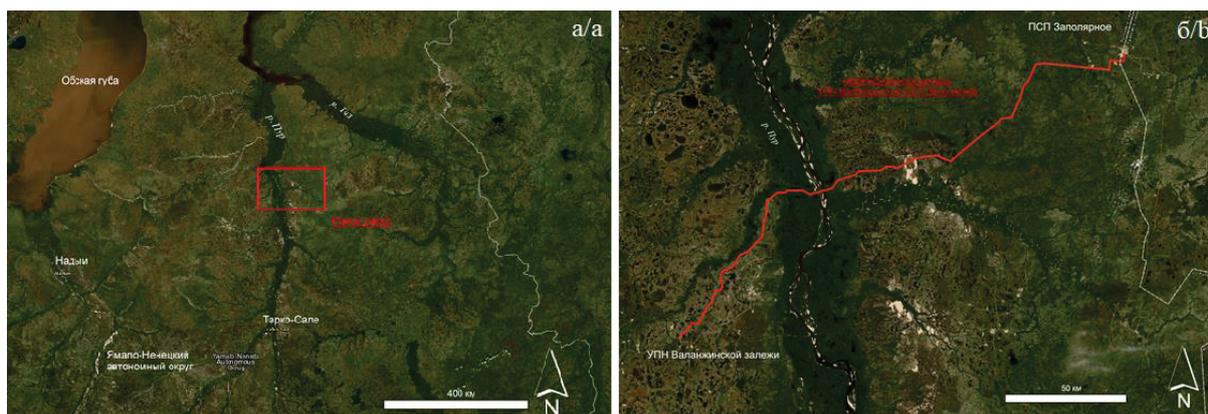


Рис. 1. Спутниковые снимки участка исследования: а) спутниковый снимок месторасположения объекта исследования; б) увеличенный вид участка, трасса нефтеконденсатопровода выделена цветом

Fig. 1. Satellite images of the study area: a) satellite image of the location of the study object; b) enlarged view of the area, the route of the oil and condensate pipeline is highlighted in color

Различные методики районирования инженерно-геологических условий рассмотрены в работах [1–25], в достаточном количестве работ отмечено использование ГИС-технологий в инженерно-геологической оценке и районировании территорий [26–39]. Для определения веса факторов при классификации объектов широко используются традиционные методы, такие как анализ главных компонент, метод анализа иерархий, и нетрадиционные, как вероятностный метод оценки [40–45]. В данном исследовании использована методика балльной оценки для факторной классификации, для районирования – учет удельного веса опасных геологических процессов для участков трассы.

#### Характеристика инженерно-геологических и климатических условий

На исследуемой территории в разные годы проводились изыскательские и тематические работы рядом организаций, в том числе институтом ВСЕГИНГЕО и МГУ им. Ломоносова. Из крупномасштабных работ можно выделить проект, выполненный ОАО «Гипротюменнефтегаз» в 2012 г. на стадии проект. Материалы прошлых лет изысканий были использованы для общей оценки инженерно-геологических и геокриологических условий, для определения категории сложности инженерно-геокриологических условий. По совокупности характеристик компонентов геологической среды район трассы отнесен к территории III категории сложности инженерно-геокриологических условий.

Климат района трассы трубопровода суровый, континентальный. Зима длится 6–6,5 месяцев, средняя температура января  $-20$ – $-24$  °С. Весна обычно короткая (30 дней), холодная, с резким изменением погоды, с частыми возвратами холода и заморозками. Средняя температура самого теплого месяца –  $12$ – $14$  °С. Осень короткая, с частыми ранними заморозками. Средние месячные скорости ветра изменяются в пределах  $3,3$ – $4,5$  м/с. Средняя высота снежного покрова из наибольших за зиму по постоянной рейке составила 72 см, максимальная – 120 см.

В связи с северным положением территории изменение притока солнечной радиации в течение года выражено крайне резко. Радиационный баланс в теплое время года положителен, с наибольшими величинами в июне–июле. Отрицательный баланс наблюдается с октября по март и достигает наименьших величин в декабре–январе. Период с положительным радиационным балансом составляет шесть месяцев – с апреля по сентябрь.

По схеме геоморфологического районирования изучаемая территория приурочена к Северной геоморфологической провинции, Обско-Газовской области, Пур-Газовскому району с преобладающим типом рельефа – волнистая равнина. Абсолютные отметки поверхности изменяются от 5,8 (урез воды в р. Пур) до 90 м (рис. 2, а). Преобладающий угол наклона поверхности до  $5^\circ$  (рис. 2, б). Максимальные превышения водоразделов над урезами рек и озер – менее 5 м.

Геологическое строение рассматриваемого объекта представлено следующими стратиграфо-генетическими комплексами: верхнеплейстоценовых и голоценовых аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений поймы (аН) и трех надпойменных террас ( $a^1\Pi_4$ -Н,  $a^2\Pi_3$ ,  $la^3\Pi_{ер}$ ) (рис. 2, в), а также современных биогенных (болотных) грунтов (бН), развитых на всех геоморфологических уровнях.

На рис. 2, г приведены значения ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) – вегетационного индекса, устойчивого к влиянию атмосферы. Значения индекса изменяются от  $-1$  до 1. Отрицательные значения характерны для водоемов и водотоков района (зеленый цвет). Растительность отображается в оттенках красного.

#### Геокриологические условия

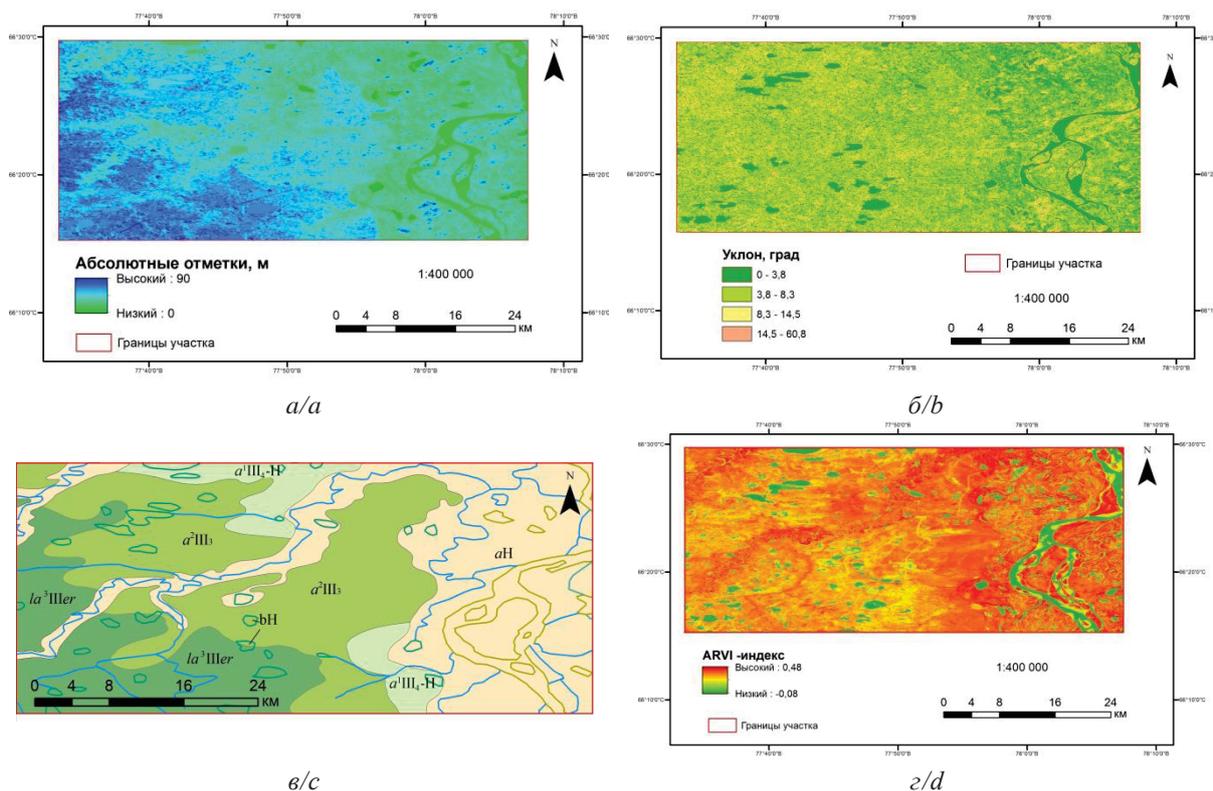
Трасса расположена на границе зон сплошного – I и прерывистого – II распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). По фактическим наблюдениям протяженность участков с ММГ по трассе нефтеконденсатопровода составляет 55,6 %. Талые грунты приурочены к долинам рек и ложбинам стока в районе крупных озер со сквозными таликами или

заглубленной кровлей ММГ. Вскрытая мощность ММГ достигает 17 м, кровля многолетнемерзлых пород на момент изысканий была встречена как с поверхности, так и на глубине от 9,2 до 10,8 м.

Особенности формирования мерзлоты связаны с климатическими условиями, тектоническим развитием территории в новейший этап и геолого-географической обстановкой, сформировавшей в регионе выдержанный геокриологический феномен – двухслойные по разрезу толщи многолетнемерзлых пород. Верхний слой позднеголоценовый, с температурой грунтов до минус 3 °С с прогрессирующей

мерзлотой, а нижний – так называемый реликтовый – преимущественно плейстоценовый, с температурой грунтов не более минус 2 °С с деградирующей мерзлотой. Среднегодовая температура мерзлых грунтов колеблется от минус 0,5 до минус 2,6 °С.

По льдистости за счет видимых ледяных включений и суммарной льдистости отмечены разновидности грунтов от нельдистых до сильнольдистых. ММГ представлены суглинками от нельдистых до льдистых, супесями от слабольдистых до сильнольдистых; слабольдистыми и льдистыми глинами; песками слабольдистыми и льдистыми.



**Рис. 2.** Характеристики инженерно-геологических условий территории: а) абсолютные отметки поверхности; б) уклон поверхности; в) стратиграфо-генетические комплексы; г) вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (ARVI-индекс)

**Fig. 2.** Characteristics of the engineering and geological conditions of the territory: а) absolute marks of the surface; б) slope of the surface; в) stratigraphic-genetic complexes; г) vegetation index, resistant to the influence of the atmosphere (ARVI-index)

По степени засоленности мерзлые грунты оценены как незасоленные.

Современные тенденции развития толщ ММГ в районе работ, в пределах древних элементов рельефа на водоразделах, имеют стабильное состояние. В пределах молодых элементов рельефа – долинных комплексов крупных рек, происходит активное промерзание, приводящее к появлению новообразований мерзлоты – «перелетков», или к поднятию кровли ММГ.

ММГ сливающегося типа приурочены к участкам развития плоскобугристых торфяников на возвышенных водоразделах (УПН Валанжинская залежь).

ММГ озерного генезиса представлены суглинками, супесями и песками. Пески характеризуются массивной криотекстурой, глинистые грунты – слоистой.

Наибольшее количество ледяных включений (шлиров) разнообразной ориентировки, форм и размеров отмечено в глинистых грунтах.

ММГ озерно-болотного генезиса представлены пластичномерзлыми торфами преимущественно средней степени разложения. Торф в мерзлом и талом состоянии характеризуется высокими значениями влажности (>100 %) и низкими значениями плотности от 0,84 до 1,03 г/см<sup>3</sup>.

#### Прогноз изменений инженерно-геологических условий при изысканиях

В теплый период года в приповерхностной части разреза возможна активизация процессов переувлажнения. Плоская ровная поверхность земли, залегание

с поверхности мощных торфяных отложений, наличие под ними глинистых грунтов с низкими фильтрационными свойствами может активизировать техногенные процессы, связанные с переувлажнением и подтоплением территории. Нарушение снежного покрова при инженерной деятельности и наличие на данной территории пучинистых грунтов может способствовать активизации процессов морозного пучения.

При нарушении мохового покрова может происходить активизация термоэрозии, проявляющаяся в виде мелких ложбин стока. При снятии растительного покрова, изменения дренарованности территории и тепловое влияние сооружений могут привести к развиту термокарста.

#### **Гидрогеологические условия**

В сферу взаимодействия трассы нефтеконденсатопровода с геологической средой в данном районе попадают грунтовые воды верхнего гидрогеологического этажа, среди которых выделяются следующие типы:

- надмерзлотные воды слоя сезонного оттаивания;
- надмерзлотные воды несквозных и сквозных таликов;
- подземные воды современного болотного горизонта.

Водовмещающими породами являются чаще талые пески, средние, мелкие или пылеватые с прослойками и линзами средних. Водоупором для выделенных горизонтов служит кровля толщи многолетнемерзлых пород, реже глинистые толщи.

Грунтовые воды несквозных и сквозных таликов на данной территории приурочены к песчаным и глинистым отложениям. На момент проведения изысканий в декабре 2013 г. – апреле 2014 г. уровень подземных вод зафиксирован на глубине от 2,2 до 11,9 м. На момент проведения изысканий в мае–июле 2018 г. уровень подземных вод зафиксирован на глубине от 0,1 до 9,8 м. Общая разгрузка водоносного горизонта в основном происходит в естественные дренажи.

Надмерзлотные воды слоя сезонного оттаивания (СТС), претерпевающие ежегодные изменения фазового состояния, приурочены к участкам развития многолетнемерзлых пород сливающегося типа и имеют повсеместное распространение на всех геоморфологических уровнях. Эти воды залегают на глубине 0,0–1,5 м от дневной поверхности непосредственно над кровлей ММГ. Воды формируются с началом сезонного оттаивания, максимальное их развитие совпадает с наибольшей глубиной сезонного оттаивания. На участках развития СТС супесчано-суглинистого состава надмерзлотные воды имеют преимущественно спорадическое распространение и малую обильность. На участках развития песчаных отложений обильность грунтовых вод несколько больше. Грунтовые воды СТС повсеместно находятся в безнапорном, часто застойном состоянии. При промерзании надмерзлотного горизонта в благоприятных условиях (при образовании локальных замкнутых систем) могут формироваться небольшие (доли атмосферы) криогенные напоры, при этом отмечено крио-

генное распучивание грунтов и формирование сезонных бугров пучения. Водообильность крайне незначительна; воды безнапорные, как правило, пресные, имеют гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-магниевый состав. В бортах дренарованных долин, сложенных тальми грунтами, уровень вод отмечен на глубине 7,2 м. Часто талые несквозные талики безводны.

Надмерзлотный горизонт несквозных таликов изолирован в пространстве толщей ММГ, реже наблюдается инфильтрация через талые грунты в горизонт сквозных подрусловых и подозерных таликов. Область питания и разгрузки подрусловых и подозерных таликов совпадает. Пойма р. Пур сложена тальми грунтами – сквозной талик, в гривах которого ниже границы промерзания встречены новообразования мерзлоты – «перелетки».

Слабоводоносный болотный горизонт залегают первым от поверхности земли, имеет локальное распространение и приурочен к болотным массивам. Водовмещающими породами являются торфы и торфяно-илистые образования, подстилаемые мелкими песками или суглинками. Воды безнапорные. Уровень воды устанавливается у поверхности земли или на глубине 0,1–0,3 м, непосредственно под травяно-моховым слоем. Мощность горизонта соответствует мощности торфяной залежи. При оттаивании песчаной толщи под верховыми болотами часть торфяного массива проседает, образуя обводненные понижения и формируя надмерзлотный горизонт несквозных или сквозных таликов. Часть болотного массива представлена крупнобугристыми торфяниками. Высота бугров от 1 до 10 м. Невысокие бугры имеют округлую форму, высокие – хребтообразную. В основании бугров залегают мерзлотное минеральное ядро, покрытое слоем торфа мощностью 1–2,5 м. В холодное время года горизонт проморожен. На момент проведения изысканий (май–июль 2018 г.) уровень подземных вод зафиксирован на глубине от 0,1 до 1,8 м.

Все типы подземных вод имеют тесную гидравлическую связь и рассматриваются как единый водоносный горизонт. Режим вод может меняться в зависимости от времени года и количества выпавших атмосферных осадков.

Часть трассы располагается на территории, затопляемой в весеннее половодье р. Пур, а также затопляемой талой и дождевой водой с водосборов ближайших водотоков бассейна р. Пур.

#### **Геологические и инженерно-геологические процессы трассы**

Из опасных геологических процессов в период изысканий по трассе встречены: заболачивание, переработка берегов (деформация русла на участках переходов через водотоки), наледообразование, морозное пучение грунтов, термокарст, затопление, подтопление. По совокупности проявления категория опасности природных процессов территории трассы относится к умеренно-опасной.

Заболачивание трассы нефтепровода составляет порядка 25 %.

**Таблица 1.** Перечень участков нефтеконденсатопровода

**Table 1.** List of pipeline sections

№ участка Site no.	Пикетаж участка Stationing of the site	Условное наименование участка Conditional name of the site	Протяженность участка, м Length of the site, m
1	ПК0+00–ПК1+27	УПН Валанжинской залежи – Узел 1 Oil treatment plant Valanginskaya deposit – Node 1	127
2	ПК1+27–ПК4+20	Узел 1–Узел 2/Node 1–Node 2	293
3	ПК4+20–ПК14+20	Узел 2–Узел 3/Node 2–Node 3	1000
4	ПК14+20–ПК160+00	Узел 3–Узел 4/Node 3–Node 4	14580
5	ПК160+00–ПК252+42,58	Узел 4–Узел 5/Node 4–Node 5	9242,58
6	ПК252+42,58–ПК260+40	Узел 5–Узел 6/Node 5–Node 6	797,42
7	ПК260+40–ПК293+45,8	Узел 6–Узел 7/Node 6–Node 7	3305,8
8	ПК293+45,8–ПК377+50	Узел 7–река Пур/Node 7–River Pur	8404,2

Морозное растрескивание грунтов происходит на водораздельных поверхностях с минимальной высотой снежного покрова, формируя медальонную тундру и полигонально-валиковые формы рельефа, активно проявляется на «свежих поверхностях», лишенных растительности.

Развитие термокарста происходит при нарушении теплообмена в системе «атмосфера – мерзлый грунт» в сторону увеличения теплопотока в годовом цикле к мерзлым грунтам. Основные формы криогенного рельефа и образований – это термокарстовые западины и озера, образовавшиеся на участках выхода на поверхность льдистых отложений. Термокарст развит локально, в настоящее время слабо прогрессирует в связи с общей деградацией мерзлоты, происшедшей естественно в результате потепления климата. Обилие озер, которые обходит трасса, подтверждает это. В настоящее время по тундре происходит перемещение термокарстовых озер, отмеченное при сравнении топокарт и космоснимков, образование подозерных таликов, образование хасыреев.

Криогенное пучение при сезонном и многолетнем промерзании грунтов развито локально. Чаще проявляется в слое сезонного промерзания–протаивания, когда в предзимний период он увлажняется до критического значения (влажности порога пучения) и представлен глинистыми грунтами. Величина сезонных бугров пучения не превышает 0,15–0,3 м, на болотах – до 0,5 м, высота многолетних бугров пучения достигает 2,5 м.

#### Результаты исследования

Из всей протяженности трассы нефтеконденсатопровода 102,4 км для анализа и инженерно-геологического районирования был выделен участок от начала трассы до реки Пур, общей протяженностью 37,8 км. Данный участок нефтеконденсатопровода можно разделить на участки меньшей длины между узлами запорной арматуры для проведения детального исследования геологических процессов на участках. На выделенном участке трассы расположено 7 узлов, делящих нефтеконденсатопровод на 8 участков (табл. 1).

Вначале были собраны и проанализированы имеющиеся опубликованные и фондовые материалы и разработана концепция районирования. В качестве источников информации для составления концепции

районирования были отобраны: данные региональных геологических исследований района, результаты бурения и опробования инженерно-геологических скважин, результаты проведения геотехнического мониторинга объекта – визуального обследования, термометрических исследований по трассе, внутритрубной диагностики профиломером и магнитными дефектоскопами, измерения уровня грунтовых вод.

Следующим этапом работы стала оценка развития опасных геологических процессов. Была разработана классификационная схема геологических процессов на основании результатов инженерных изысканий – для рассмотрения выделены геологические процессы, проявившиеся в районе. Каждый процесс по степени распространения и, как следствие, своему влиянию на эксплуатацию трубопровода охарактеризован по балльной шкале с разбивкой на 2–4 градации (табл. 2).

Обобщенная оценка развития опасных геологических процессов (в баллах) по каждому выделенному участку трассы приведена на рис. 3.

**Таблица 2.** Оценка развития геологических процессов

**Table 2.** Assessment of engineering-geological conditions

Критерий оценки Evaluation criterion	Характеристика Description	Вес критерия в баллах Criterion weight in points
Заболачивание/Bogging	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Переработка берегов (переходы через водотоки) Bank processing (crossings through watercourses)	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Наледеобразование Ice mound formation	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Морозное пучение грунтов Frost heave	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Термокарст/Thermokarst	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Обводнение/Watering	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Наличие многолетнемерзлых пород Permafrost presence	Отсутствие/Absense	0
	Островное/Sporadic	0,5
	Прерывистое Discontinuous	1
	Сплошное Continuous	2

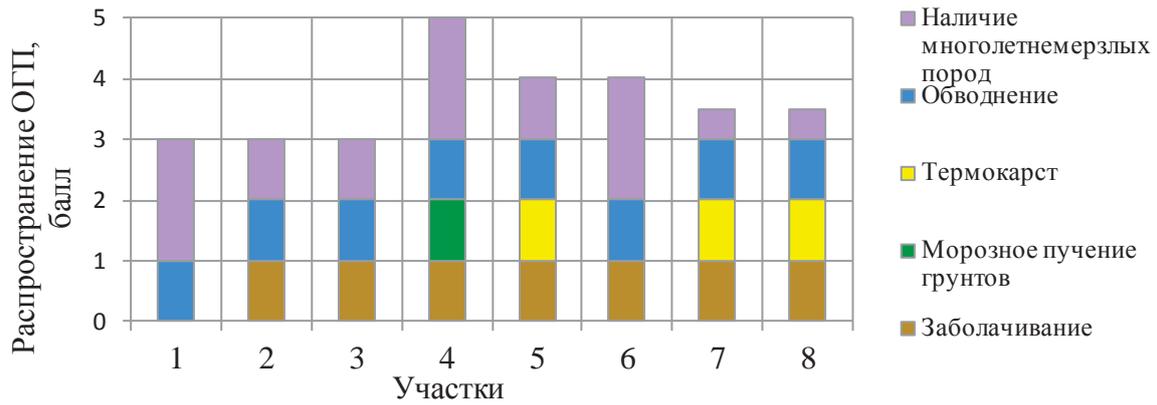


Рис. 3. Балльная оценка инженерно-геологических участков трассы  
 Fig. 3. Scoring of engineering-geological sections of the route

Нами установлено, что по трассе от УПН до реки Пур в период эксплуатации нефтеконденсатопровода активизировались некоторые ОГП, описанные при выполнении инженерных изысканий. Так, на всех участках трассы отмечено наличие ММГ различных типов распространения: сплошное распространение ММГ со сливающейся мерзлотой на участках № 1, 4, 6, прерывистое распространение со сквозными и несквозными таликами на участках № 2, 3, 5, и редкостровое распространение на участках № 7, 8. Именно поэтому на части трассы были предусмотре-

ны мероприятия по температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов (рис. 4, а), однако зафиксировано изменение геокриологических условий: весной 2022 г. обнаружены проявления обводнения, которые встречены на всех восьми участках трассы, заболачивания встречены на семи из восьми участков трассы (рис. 4, а, б).

Также по трассе были встречены локальные проявления морозного пучения – на участке № 4, при переходе через автодорогу; термокарста – выявлены на участках № 5, 7, 8 (рис. 4, в, г).



Рис. 4. Геологические процессы по трассе трубопровода: а) заболачивание; б) обводнение; в) термокарст; г) морозное пучение  
 Fig. 4. Geological processes along the pipeline route: a) swamping; b) watering; c) thermokarst; d) frost heaving

На основании методики балльной оценки развития геологических процессов была предложена модель районирования участков трассы по сложности инженерно-геологических условий для эксплуатации трубопровода (табл. 3).

**Таблица 3.** Модель районирования  
**Table 3.** Zoning model

Наименование таксона Taxon name	Оценка условий Evaluation of conditions	Значения граничного критерия Boundary criterion values, %
I	Благоприятные условия Favourable conditions	$\gamma < 25$
II	Умеренно благоприятные условия Moderately favourable conditions	$25 \leq \gamma < 50$
III	Неблагоприятные условия Unfavourable conditions	$50 \leq \gamma < 75$
IV	Весьма неблагоприятные условия Very unfavourable conditions	$75 \leq \gamma$

#### Обоснование граничных условий для выделения таксонов

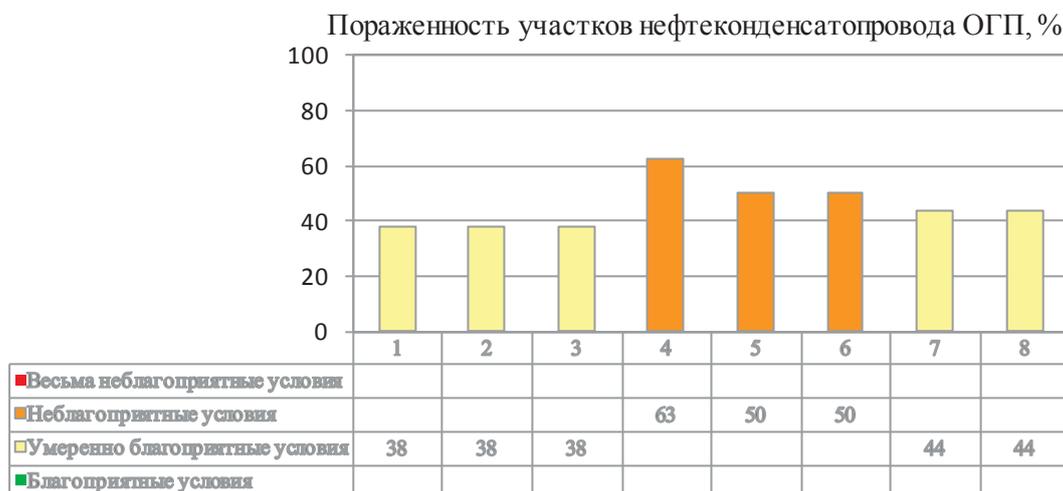
В соответствии с моделью районирования был назначен граничный критерий  $\gamma$  – удельный вес выявленных опасных геологических процессов для участка трассы.

Оценку удельного веса предлагается определять по формуле:

$$\gamma = \frac{\sum i}{n * 100},$$

где  $\gamma$  – удельный вес воздействия опасных геологических процессов на определенном участке трубопровода, %;  $i$  – вес критериев выявленных опасных геологических процессов в баллах;  $n$  – максимальное количество баллов в соответствии с классификационной схемой.

В соответствии с моделью районирования выделенные ранее участки нефтеконденсатопровода были проранжированы по сложности инженерно-геологических условий, пораженность участков трассы ОГП приведена на рис. 5.



**Рис. 5.** Распространение опасных геологических процессов на участках трубопровода  
**Fig. 5.** Distribution of dangerous geological processes in the pipeline sections

По полученным инженерно-геологическим данным выделены следующие таксоны:

- I – таксон, характеризуемый благоприятными условиями, по трассе нефтеконденсатопровода не выявлен;
- II – таксон, характеризуемый умеренно благоприятными условиями, по трассе выявлено 5 участков. Участки сложены в основном низкотемпературными многолетнемерзлыми грунтами, твердомерзлыми суглинками и песками. На участках встречены процессы обводнения и заболачивания, а также на двух из пяти участков встречены процессы термокарста;
- III – таксон характеризуется неблагоприятными условиями, по трассе выявлено 3 участка. Участки имеют сложное геологическое строение, сложены в основном пластичномерзлыми суглинками и супесями с часто сменяемым наличием по трассе сквозных и несквозных таликов. Из процессов

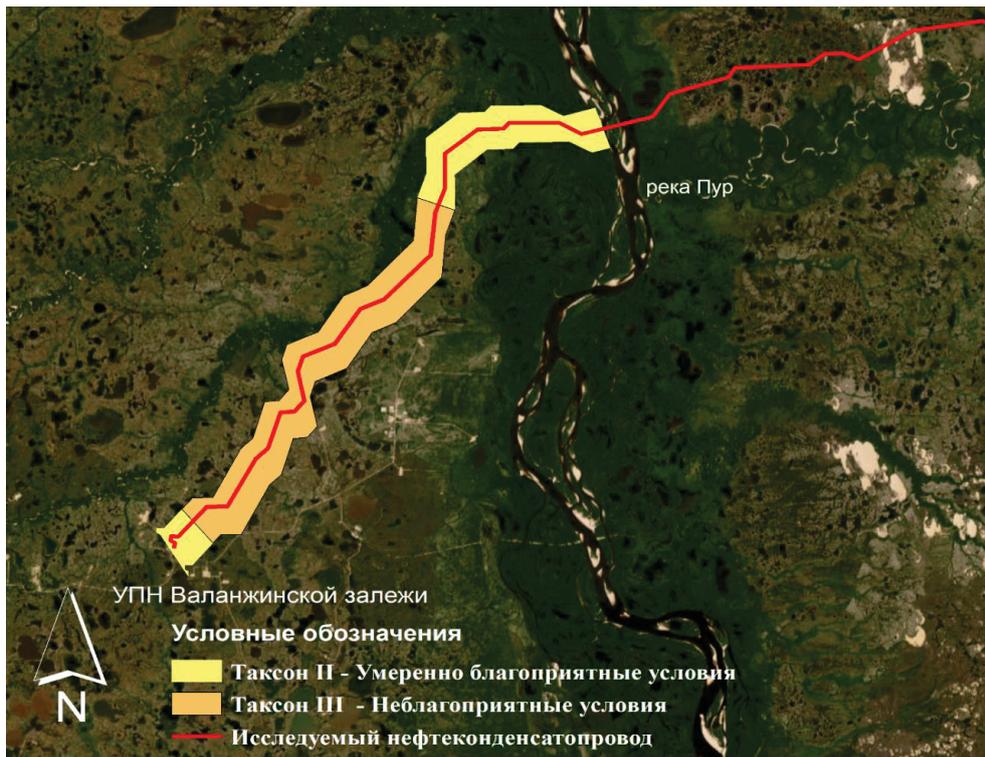
наблюдаются заболачивание, обводнение, морозное пучение;

- IV – таксон характеризуется весьма неблагоприятными условиями, по трассе нефтеконденсатопровода не выявлен.

Таким образом, в результате проведенного инженерно-геологического районирования исследуемая часть трассы нефтеконденсатопровода разделена на 8 инженерно-геологических участков, которые были ранжированы на 4 класса по степени инженерно-геологической сложности, из которых на трассе были выявлены только 2 (рис. 6).

#### Сравнение результатов инженерно-геологического районирования

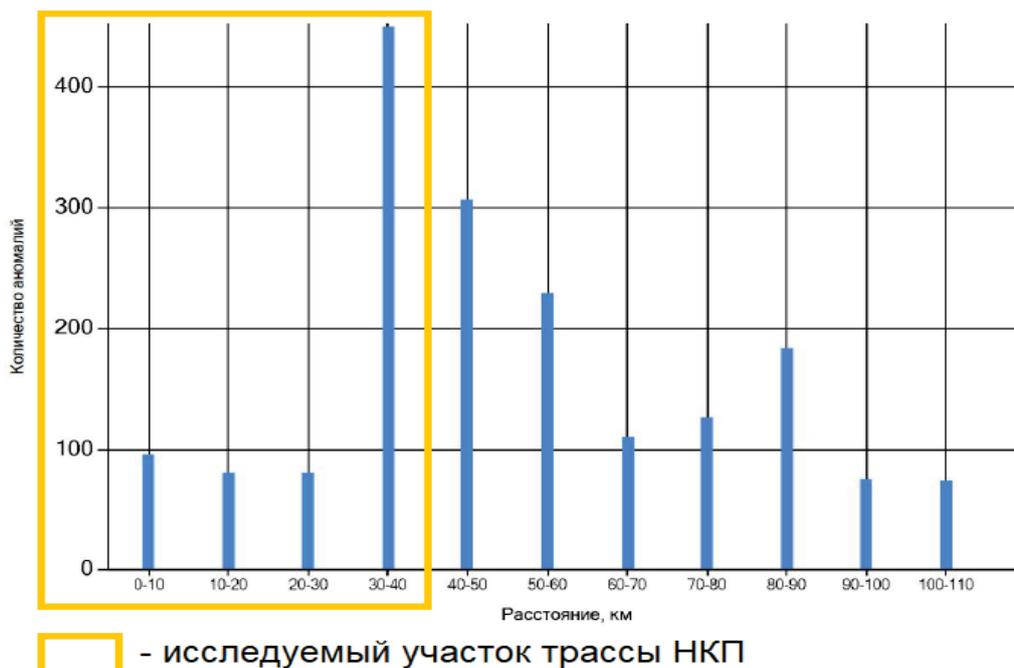
Было проведено сравнение результатов ранжирования участков трубопровода с результатами проведенного в 2022 г. внутритрубного обследования трубопровода профиломером и магнитными дефектоскопами с продольным и поперечным намагничиванием.



**Рис. 6.** Карта инженерно-геологического районирования участков трассы нефтеконденсатопровода  
**Fig. 6.** Map of engineering-geological zoning of sections of the oil and condensate pipeline route

В соответствии с техническим отчетом по результатам внутритрубного обследования по всей длине трубопровода было выявлено 1812 различных аномалий, таких как: аномалия кольцевого шва, вмятины, коррозия, заводские дефекты, механические повреждения, аномалии по линейным размерам потерь металла и другие.

Распределение выявленных аномалий говорит о том, что самый опасный участок трубопровода с наибольшим количеством аномалий – 30–40 км трассы, который соответствует участку № 8, выделенному в данном исследовании, остальные участки имеют относительно схожее количество аномалий, равномерно распределенных по участкам трассы (рис. 7).



**Рис. 7.** Распределение аномалий по трассе трубопровода, выявленных при профилометрии  
**Fig. 7.** Distribution of anomalies along the pipeline route identified during profile logging

Стоит уточнить, что при инженерно-геологическом районировании не учитывались способы прокладки трубопровода, которые могут оказывать влияние на количество выявляемых аномалий, а также нужно отметить инерционность системы «многолетнемерзлый грунт – трубопровод». Однако стоит выделить участок № 8, на котором были отмечены процессы термокарста, что также может говорить о серьезном изменении пространственного положения трубопровода, что, в свою очередь, сказывается на количестве выявленных аномалий трубопровода.

На участке 30–40 км трассы, соответствующем участку № 8, расположено 3 участка переходов через водные преграды, выполненных методом наклонно-направленного бурения, общей протяженностью 3 км, что также может сказываться на количестве выявленных аномалий. Участки 0–30 км, соответствующие участкам № 1–7, показывают одинаково усредненные значения аномалий, что совпадает с установленной сложностью участков трассы.

В целом результаты инженерно-геологического районирования совпадают на 7 участках из 8 с результатами проведенной внутритрубной диагностики трубопровода.

#### Выводы

1. В результате инженерно-геологического районирования территория эксплуатируемой трассы разделена на 8 инженерно-геологических участков, которые ранжированы на 4 класса по степени сложности инженерно-геологических условий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. Фридовский. – Якутск, 8–10 апреля 2020. – Якутск: ИД СВФУ, 2020. – С. 430–433.
2. 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 // Вести газовой науки. – 2020. – № 2 (44). – С. 34–50.
3. 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.
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. – С. 360–373.
5. 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.
6. Реутских Н.В., Бережной М.А., Дуденко И.А. Геотехнический мониторинг для магистральных трубопроводов в различных типах многолетнемерзлых пород // Научный журнал Российского газового общества. – 2016. – № 2. – С. 22–26.

2. Около 35 % длины исследованной трассы находится в умеренно благоприятных инженерно-геологических условиях, около 65 % – в неблагоприятных условиях. Участков с весьма неблагоприятными и благоприятными условиями на исследуемой части трассы не выявлено.
3. На основе проведенных исследований можно предложить некоторые рекомендации по включению в программу проведения геотехнического мониторинга мероприятий для повышения безопасности и снижению уровня сложности инженерно-геологических условий трассы:
  - Следует предусмотреть мероприятия по отводу поверхностных вод от коридора прокладки трубопровода на участках трассы – дополнительную отсыпку защитного валика, восстановление растительного покрова, устройство дренажных систем и другие;
  - Не допускать дальнейшего заболачивания и обводнения трассы на участках с умеренно-благоприятными условиями;
  - Уделить особое внимание при проведении геотехнического мониторинга участкам с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями.
4. Предлагаемая методика инженерно-геологического районирования эксплуатируемой трассы нефтеконденсатопровода является быстрым способом установления опасных геологических процессов и выявления опасных участков по трассе. Установлено, что самые распространенные опасные геологические процессы на трассе НКП – обводнение и заболачивание.
7. Stroková 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).
8. Середин В.В., Красильников П.А. Инженерно-геологическое районирование, основанное на многомерной оценке классификационного показателя // Вестник Пермского университета. Геология. – 2016. – № 2 (31). – С. 48–54. DOI: 10.17072/psu.geol.31.48. EDN WFEFNF.
9. Гайнанов Ш.Х., Коноплев А.В., Козловский С.В. Инженерно-геологическое районирование с использованием ГИС объектов обустройства скважин Чураковского нефтяного месторождения // Вестник Пермского университета. Геология. – 2020. – Т. 19. – № 4. – С. 372–379. DOI: 10.17072/psu.geol.19.4.372. EDN LUYXPJ.
10. 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.
11. 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.
12. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures / N. Grendas, V. Marinou, 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).
13. 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.
14. Баборыкин М.Ю. Сходимость результатов дистанционного метода дешифрирования с полевыми работами на линейном объекте. На примере оползневой участка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 161–175.
  15. 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.
  16. 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. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 117–126.
  17. Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю. Типизация инженерно-геологических условий территории трассы проектируемой железной дороги Элегест–Кызыл–Курагино // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 64–77.
  18. 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. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
  19. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 27–41.
  20. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Анализ деформаций проекторной мачты при помощи наземного лазерного сканирования и метода конечных элементов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 7–17.
  21. Оценка инженерно-геокриологических условий Берегового нефтегазоконденсатного месторождения / Л.А. Строкова, Д.В. Пургина, Э.И. Галеева, А.Н. Курчатова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 6–19.
  22. Строкова Л.А., Галеева Э.И., Леонова А.В. Районирование инженерно-геокриологических условий трассы трубопровода на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 14–22.
  23. Строкова Л.А., Нечаев Д.А. Роль опасных геологических процессов при эксплуатации и нефтепровода «Чаянда-ВСТО» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 125–134.
  24. Heam G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742.
  25. Селезнева Ю.Н., Ядзинская М.Р. Инженерно-геологическое районирование участка железной дороги методом вероятностной оценки классификационного показателя // Вестник Пермского университета. Геология. – 2021. – Т. 20. – № 2. – С. 142–149. DOI: 10.17072/psu.geol.20.2.142. EDN ESFXHN.
  26. Li X., Wu Q., Jin X. Mitigation strategies and measures for frost heave hazards of chilled gas pipeline in permafrost regions: a review // Transportation Geotechnics. – 2022. – V. 36. – P. 100786.
  27. Thermal and mechanical analysis of the China–Russia Crude Oil Pipeline suffering settlement disaster in permafrost regions / J. Zhou, Z. Liang, L. Zhang, T. Zheng, J. Zheng // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – V. 199. – P. 104729.
  28. Numerical evaluation of the effectiveness of frost heave mitigation strategies for chilled arctic gas pipelines / X. Li, Q. Wu, H. Jin, R. Shi, G. Wu, Y. Cao // Research in Cold and Arid Regions. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2022.12.002> (дата обращения 01.06.2022).
  29. Li G. et al. A newly integrated ground temperature dataset of permafrost along the China–Russia crude oil pipeline route in Northeast China // Earth System Science Data. – 2022. – V. 14. – № 11. – P. 5093–5110.
  30. Vladova A.Y. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline // Mathematics. – 2022. – V. 10. – № 11. – P. 1813.
  31. Changes in near-surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model / S. Huang, Q. Ding, K. Chen, Z. Hu, Y. Liu, X. Zhang, L. Ding // Cold Regions Science and Technology. – 2023. – V. 206. – P. 103709.
  32. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure / V.P. Melnikov, V.I. Osipov, A.V. Brouchkov, S.V. Badina, M.R. Sadurtdinov, D.S. Drozdov, R.Y. Fedorov // Energies. – 2022. – V. 15. – № 9. – P. 3190.
  33. Monitoring the permafrost conditions along pipeline routes in Central Yakutia, Russia / S. Varlamov, P. Skryabin, A. Zhirkov, Z. Wen // Land. – 2022. – V. 11. – № 12. – P. 2331.
  34. Wang F. et al. Assessment of permafrost disturbances caused by two parallel buried warm-oil pipelines: a case study at a high-latitude wetland site in Northeast China // Cold Regions Science and Technology. – 2022. – V. 206. – P. 103753.
  35. Shen Y. et al. Fuzzy comprehensive safety evaluation of pipeline disaster in China–Russia crude oil permafrost region based on improved analytic hierarchy process-entropy weight method // Advances in Materials Science and Engineering. – 2022. – V. 2022. – P. 1–10.
  36. Li X., Wu Q., Jin H. New methods for predicting strain demand of Arctic gas pipelines across permafrost under frost heave displacement // Geofluids. – 2022. – V. 2022. – P. 1–16.
  37. 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.
  38. 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.
  39. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping / T. Gudiyangada Nachappa, S. Kienberger, S.R. Meena, D. Höbbling, T. Blaschke // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 572–600.
  40. 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.
  41. Gebreegziabher T., Suryabhagavan K.V., Kumar Raghuvarshi T. Web GIS-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).
  42. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askaoun watershed, southern Morocco / A. Tairi, A. Elmouden, L. Bouchaou, M. Abouloufa // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14. – № 9. – P. 1–22.
  43. 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.
  44. 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.
  45. 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.

Поступила 10.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 26.05.2023 г.

**Информация об авторах**

*Филимонов А.А.*, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; главный специалист отдела геотехнического мониторинга и прогнозного моделирования АО «ТомскНИПИнефть».

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

UDC 624.131

## ASSESSMENT OF ENGINEERING AND GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY OF THE OPERATED PIPELINE ROUTE ON THE MALKHOYAKHA–PUR INTERFLUVE

Andrey A. Filimonov<sup>1,2</sup>,  
andrey\_filimonoff@list.ru

Lyudmila A. Stroková<sup>1</sup>,  
sla@tpu.ru

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

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

**The relevance** of the work is determined by the importance of trouble-free operation of pipeline transport facilities located in the permafrost zone. Manifestations of dangerous engineering and geological processes during the operation of an underground pipeline can lead to changes in the permafrost soil-pipeline system, which will entail the occurrence of off-design loads on the pipeline body, pipeline failures and accidents. It is required to analyze the activation and development of dangerous geological processes along the pipeline route in order to correctly assess changes in engineering and cryological conditions during pipeline operation.

**The main aim** is to rank sections of the route with developing hazardous geological processes and to identify their impact on the conditions for the further operation of the facility.

**Methods:** analysis of the results of engineering surveys on the object of study and geotechnical monitoring data of the oil and condensate pipeline; evaluation methods for zoning sections of the route

**Results.** At the first stage of the study, the route was classified, the study areas were identified, and criteria were determined for assessing active hazardous geological processes using the scoring method. At the second stage, the zoning model was determined, the boundary criteria  $\gamma$  (the proportion of identified hazardous geological processes for the section of the route) were designated, tax a were designated, sections of the route were ranked in accordance with the zoning model. The most vulnerable sections of the oil and condensate pipeline route from the point of view of the manifestation of geological processes were identified.

### Key words:

zoning, engineering-geological conditions, dangerous geological processes, underground pipeline, permafrost soils.

### REFERENCES

- Varlamov S., Scryabin P. Inzhenerno-geokriologicheskoe sostoyanie koridorov trass truboprovodov tsentralnoy Yakutii [Engineering-geocryological state of corridors of pipelines of Central Yakutia]. *X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym 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.
- 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.
- Trifonov O.V., Morin I.Yu., Volodin P.A. Printsipy klassifikatsii uchastkov po prognozirovomoy 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.
- 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.
- Kazantseva L.A., Vorobyeva S.V. Monitoring of geocryological conditions of natural landscapes on the route of the Nadya-Punga gas pipeline. *Transport and mechanical engineering of West Siberia*, 2020, no. 1, pp. 29–35. In Rus.
- 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.
- Stroková 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).
- Seredin V.V., Krasilnikov P.A. Engineering-geological zoning based on a multidimensional assessment of the classification indicator. *Bulletin of the Perm University. Geology*, 2016, no. 2 (31), pp. 48–54. In Rus. DOI: 10.17072/psu.geol.31.48. EDN WFENF.
- Gainanov Sh.Kh., Konoplev A.V., Kozlovsky S.V. Engineering-geological zoning using GIS of well facilities at the Churakovskiy oil field. *Bulletin of the Perm University. Geology*, 2020, vol. 19, no. 4, pp. 372–379. In Rus. DOI: 10.17072/psu.geol.19.4.372. EDN LUYX PJ.
- 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>
- 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.
- Grendas N., Marinos V., Papathanassiou G., Ganas 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).
13. 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.
  14. 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.
  15. Elizarov A.S., Kurchatova A.N. Monitoring of elevated pipelines using global navigation satellite systems. *Siberian State University of Geosciences and Technologies*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 28–42. In Rus.
  16. 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.
  17. Strokova L.A., Nadezhdina 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.
  18. Strokova L.A., Dmitriev 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.
  19. Strokova L.A., Epifanova E.A. Evaluation of deformation of a historic building in Tomsk by an integrated approach based on terrestrial laser scanner and finite element modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 27–41. In Rus.
  20. Epifanova E.A., Strokova L.A. Numerical analysis of deformations of the lighting mast by ground laser scanning and finite elements method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 7–17. In Rus.
  21. Strokova L.A., Purgina D.V., Galeeva E.I., Kurchatova A.N. Evaluation of engineering-geocryological conditions of the Beregovoye oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 6–19.
  22. 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.
  23. Strokova L.A., Nechaev D.A. The role of hazardous geological processes in the operation of the Chayanda-ESPO oil pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 125–134.
  24. 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.
  25. Selezneva Yu.N., Yadrinskaya M.R. Engineering-geological zoning of the railway section by the method of probabilistic assessment of the classification indicator. *Bulletin of the Perm University. Geology*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 142–149. In Rus. DOI: 10.17072/psu.geol.20.2.142. EDN ESFXHX.
  26. Li X., Wu O., Jin X. Mitigation strategies and measures for frost heave hazards of chilled gas pipeline in permafrost regions: a review. *Transportation Geotechnics*, 2022, vol. 36, no. pp. 100786.
  27. Zhou J., Liang Z., Zhang L., Zheng T., Zheng J. Thermal and mechanical analysis of the China–Russia Crude Oil Pipeline suffering settlement disaster in permafrost regions. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, vol. 199, pp. 104729.
  28. Li X., Wu Q., Jin H., Shi R., Wu G., Cao Y. Numerical evaluation of the effectiveness of frost heave mitigation strategies for chilled arctic gas pipelines. *Research in Cold and Arid Regions*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2022.12.002> (accessed 1 June 2022).
  29. Li G., Ma W., Wang F., Jin H., Fedorov A., Chen D., Li Y. A newly integrated ground temperature dataset of permafrost along the China–Russia crude oil pipeline route in Northeast China. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14 (11), pp. 5093–5110.
  30. Vladova A.Y. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline. *Mathematics*, 2022, vol. 10 (11), 1813.
  31. Huang S., Ding Q., Chen K., Hu Z., Liu Y., Zhang X., Ding L. Changes in near-surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, vol. 206, pp. 103709.
  32. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Badina S.V., Sadurtdinov M.R., Drozdov D.S., Fedorov R.Y. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure. *Energies*, 2022, vol. 15 (9), 3190.
  33. Varlamov S., Skryabin P., Zhirkov A., Wen Z. Monitoring the permafrost conditions along pipeline routes in Central Yakutia, Russia. *Land*, 2022, vol. 11 (12), 2331.
  34. Wang F., Li G., Ma W., Chen D., Wu G., Cao Y., Che F. Assessment of permafrost disturbances caused by two parallel buried warm-oil pipelines: a case study at a high-latitude wetland site in Northeast China. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, pp. 103753.
  35. Shen Y., Chen D., Zhang M., Zuo T. Fuzzy comprehensive safety evaluation of pipeline disaster in China–Russia crude oil permafrost region based on improved analytic hierarchy process-entropy weight method. *Advances in Materials. Science and Engineering*, 2022, vol. 206 (2), pp. 1–10.
  36. Li X., Wu Q., Jin H. New methods for predicting strain demand of Arctic gas pipelines across permafrost under frost heave displacement. *Geofluids*, 2022, vol. 2022, pp. 1–16.
  37. 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.
  38. 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.
  39. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S.R., Hölbling 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.
  40. 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.
  41. Gebreegziabher T., Suryabhagavan 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).
  42. Tairi A., Elmouden A., Bouchaou L., Aboulouafa M. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askaoun watershed, southern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 1–22.
  43. 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 GS*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 1–13.
  44. 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, vol. 5, no. 1, pp. 71–93.
  45. Teshome A., Halefom A., Teshome M., Ahmad I., Taddelle 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.

Received: 10 January 2023.

Reviewed: 26 May 2023.

#### Information about the authors

**Andrey A. Filimonov**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; chief specialist, JSC TomskNIPIneft.

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

УДК 622.24+621.694.2

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАДДОЛОТНОГО СТРУЙНОГО НАСОСА ДЛЯ ВРЕМЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА

Мельников Александр Павлович<sup>1</sup>,  
m1a1p@yandex.ru

Буглов Николай Александрович<sup>1</sup>,  
bna@istu.edu

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**Актуальность.** Эффективность нефтегазовых скважин зависит от качества работ на этапе заканчивания скважин, а именно от выполнения первичного вскрытия продуктивного пласта. Одна из главных задач при вскрытии продуктивного пласта – сохранить естественные свойства продуктивного пласта-коллектора. Эту задачу можно решить путем временной изоляции пласта путем кольматации. Идея использовать наддолотный эжектор для измельчения шлама и дальнейшей подачи его на кольмататор с целью временной изоляции продуктивного пласта достаточно интересна. Это позволяет заменить металлоёмкое наземное оборудование, которое используется для подобных задач.

**Цель:** проверка на адекватность полученных ранее уравнений напора струйного насоса как функции от коэффициента инжекции, с учетом возможных смещений сопла (углового и эксцентрического), а также с учетом гидравлических потерь на трение в камере смешения и в диффузоре.

**Объект:** наддолотный эжектор со смещениями рабочего сопла (угловым и радиальным эксцентрическим) относительно оси камеры смешения.

**Методы:** факторное экспериментальное исследование характеристик высоконапорного струйного насоса с помощью разработанной лабораторной установки.

**Результаты.** Предложена методика экспериментального исследования основных характеристик наддолотного струйного насоса. Струйный насос предназначен для измельчения инжектированного шлама непосредственно в камере смешения и дальнейшей подачи его на кольмататор, чтобы обеспечить временную изоляцию призабойной зоны во время первичного вскрытия пласта. Разрушение шлама происходит с помощью рабочей струи, которая направлена на стенку камеры смешения. Направление потока задается угловым и эксцентрическим смещением насадки струйного насоса. Результаты исследования подтвердили адекватность полученных ранее напорных характеристик высоконапорного струйного насоса. В напорных характеристиках учтены геометрические параметры проточной части наддолотного струйного насоса.

### Ключевые слова:

Методика исследования, факторный эксперимент, высоконапорный струйный насос, проверка адекватности, коэффициент напора, лабораторный стенд, экспериментальные данные.

### Введение

Главная причина низкой эффективности струйных насосов в наддолотных эжекторных системах заключается в том, что струйный насос является элементом сложной гидравлической системы [1] и работает в нестационарном режиме [2]. Работа наддолотного струйного насоса зависит от работы других элементов системы очистки забоя, а именно, от работы гидравлической системой гидромониторного долота [3].

Основное преимущество струйных насосов – простота их конструкции, надежность и компактность [4]. Высокая надежность наддолотного эжектора связана с тем, что в его конструкции отсутствуют подвижные элементы [5]. Узконаправленное применение наддолотных эжекторов связано с тем, что при их проектировании не учитываются нестационарные процессы в компоновке низа буровой колонны [6].

В свое время А.В. Лягов и Б.З. Султанов разработали конструкцию забойного шламодробителя, идея которого заключалась в измельчении выбуренного шлама за счет работы струйного насоса [7]. Временная изоляция продуктивных пластов кольматацией реализована по результатам научных трудов Н.А. Шамова, А.В. Лягова, К.И. Халикова, Е.Г. Асеева и

других. Опираясь на этот опыт, была предложена конструкция устройства для бурения со струйным насосом для временной изоляции пласта в процессе первичного вскрытия [8].

Цель экспериментального исследования – проверка на адекватность системы уравнений (4) [9], которая позволяет анализировать влияние (рис. 1) углового (рис. 2) и эксцентрического (рис. 3) смещений рабочего сопла относительно оси камеры смешения [10] на напор струйного насоса, при этом также учитывая потери энергии на гидравлическое трение в проточной части эжектора [11]. Наддолотный эжектор предназначен для разрушения шлама, подачи его на сопло кольмататора [12]. Экспериментальное исследование напорной характеристики струйного насоса позволит получить математическую модель, которая описывается формулами (1)–(3) [13, 14]. Эти зависимости будут использованы для проектирования устройств на основе наддолотного струйного насоса для временной изоляции продуктивных пластов при первичном вскрытии [13]. В предложенном эжекторе дробление шлама происходит за счет смещения рабочего сопла (углового и эксцентрического).

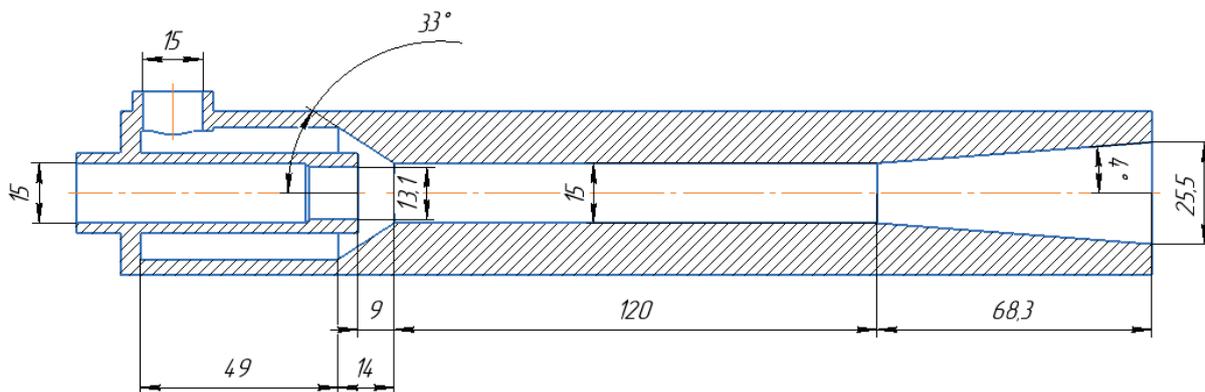


Рис. 1. Основные геометрические размеры струйного насоса  
 Fig. 1. Basic geometric dimensions of the jet pump

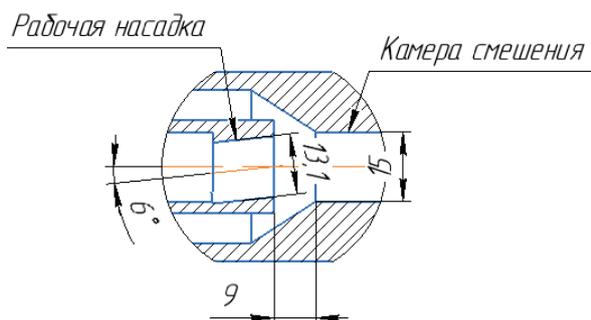


Рис. 2. Угловое смещение рабочей насадки [10]  
 Fig. 2. Angular displacement of the working nozzle [10]

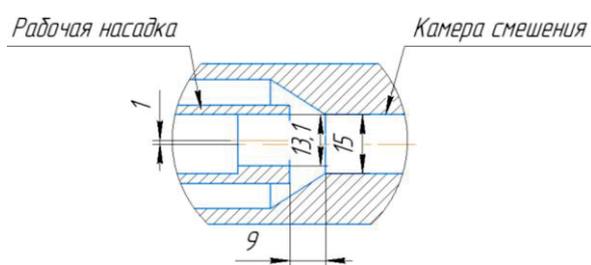


Рис. 3. Эксцентрическое смещение рабочей насадки [10]  
 Fig. 3. Eccentric displacement of the working nozzle [10]

#### Материалы и методы исследования

Методика исследования работы высоконапорного струйного насоса в стационарном режиме заключается в измерении рабочего  $\Delta p_p$  и полезного  $\Delta p_i$  перепадов давления для заданного коэффициента инжекции  $i$  при различных значениях:

- углового смещения  $\alpha$ ;
- эксцентрического смещения  $e$ ;
- гидравлической шероховатости диффузора и камеры смешения  $\Delta$ .

Спланирован дробный факторный эксперимент для проверки полученной ранее системы уравнений, которая позволяет рассчитать основные характеристики струйного насоса.

#### Результаты исследования и их обсуждение

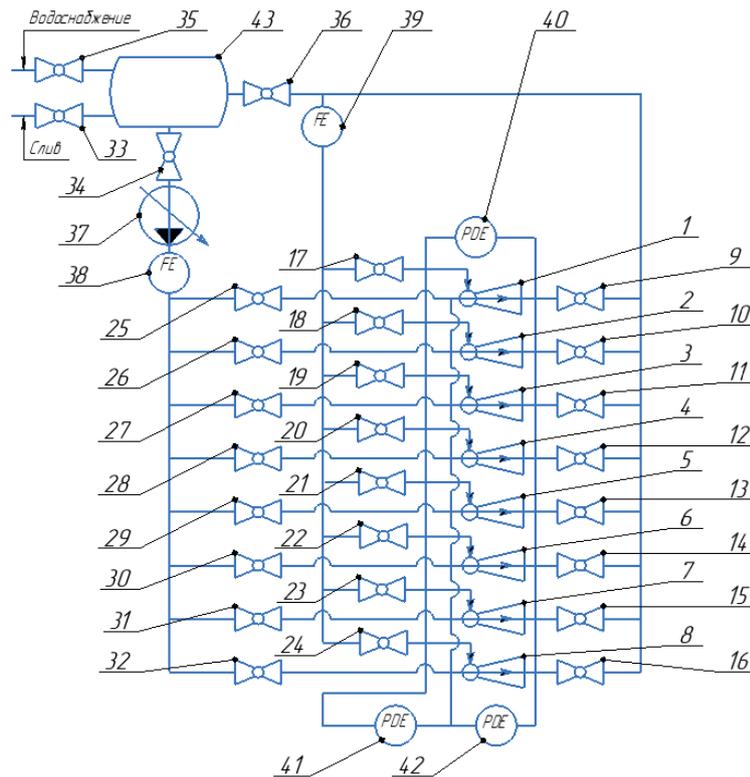
Схема лабораторного стенда для исследования струйного насоса изображена на рис. 4 [10].

Лабораторный стенд (рис. 4) состоит из батареи параллельно соединенных струйных насосов – 1–8. Конструкция струйного насоса – 1, шероховатость проточной части которого  $\Delta=0,02$  мм, показана на рис. 1. Конструкция проточной части струйных насосов – 2–8 отличается от конструкции струйного насоса – 1 смещением рабочей насадки, а также шероховатостью камеры смешения и диффузора согласно плану эксперимента, описанному ниже.

Подача воды (рис. 4) осуществляется с помощью насосной станции – 37, подпор насоса обеспечивает бак – 43 [10]. Регулировка подачи насосной станции осуществляется с помощью органов управления самой станции и шаровых кранов – 25–32. При этом семь из восьми кранов – 25–32 всегда «закрыты» полностью, так как измерение рабочих характеристик струйных насосов производится по одному. Расход рабочего и инжектированных потоков определяют с помощью датчиков – 38, 39. Регулировка инжекции по плану эксперимента осуществляется с помощью шаровых кранов – 17–24, 36. Единственный открытый кран 9–16 должен быть на той же линии, что и открытые краны – 17–24 и 25–32. Перепад давления на струйном насосе измеряют с помощью датчика – 42. Измерение перепада давления  $\Delta p_p = p_p - p_i$  осуществляется с помощью датчика – 41. Измерения полезного перепада давления  $\Delta p_i = p_d - p_i$  осуществляется с помощью датчика – 40.

Перед пуском насосной станции – 37 необходимо убедиться, что: шаровые краны – 34, 36 «открыты»; один из шаровых кранов 25–32 «открыт»; шаровые краны 9–16 «открыты». После первого включения насосной станции необходимо выдерживать определенное время для удаления воздуха из гидравлической системы [10] установки.

Радиальное смещение и поворот сопла струйных насосов – 1–8, а также шероховатость камеры смешения и диффузора [7] указаны в табл. 1.



**Рис. 4.** Схема лабораторного стенда [10]: 1–8 – струйный насос [10]; 9–36 – шаровой кран; 37 – насос; 38, 39 – датчик расхода; 40–42 – датчик дифференциального давления, 43 – подпорный бак

**Fig. 4.** Scheme of the laboratory stand: 1–8 – jet pump; 9–36 – ball valve; 37 – pump; 38, 39 – flow sensor; 40–42 – differential pressure sensor, 43 – backup tank

Технические характеристики лабораторного стенда [10]:  
 Габаритные размеры, мм

- длина ..... 1682
- ширина ..... 2000
- высота ..... 1370

Насос:

- максимальная подача, м<sup>3</sup>/с ..... 0,0072
- максимальный напор, м ..... 246

Струйный насос

- диаметр рабочей насадки, мм ..... 13,1
- диаметр камеры смешивания, мм ..... 15

Контрольно-измерительные приборы:

- датчик дифференциального давления (3 шт.) ..... ЭМИС-БАР 188
- датчик расхода (2 шт.) ..... ВСЭ-М-И 32

Откликом факторного эксперимента является коэффициент напора  $\bar{h}$ :

$$\bar{h} = f(\alpha, e, \Delta, Q_p, i), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угловое смещение рабочей насадки, градусы;  
 $e$  – эксцентрическое смещение рабочей насадки, м;  
 $\Delta$  – гидравлическая шероховатость камеры смешения и диффузора, м;  $Q_p$  – подача рабочей жидкости, м<sup>3</sup>/с;  
 $i$  – коэффициент инжекции.

Кодируем факторы эксперимента:

$$X_1 = \alpha; X_2 = e; X_3 = \Delta; X_4 = Q_p; X_5 = i.$$

Отклик  $\bar{h}$  будем определять по плану измерения (табл. 2).

**Таблица 1.** Геометрические параметры струйных насосов

**Table 1.** Geometric parameters of jet pumps

Порядковый номер струйного насоса на схеме Serial number of a jet pump in the diagram	Угловое смещение рабочей насадки, градусы Angular displacement of the working nozzle $\alpha$ , degrees [10]	Эксцентрическое смещение рабочей насадки, мм Eccentric displacement of the working nozzle $e$ , mm [10]	Шероховатость проточной части камеры смешения и диффузора, мм Roughness of the flow part of the mixing chamber and diffuser $\Delta$ , mm [11]
1	0	0	0,02
2	6	0	0,02
3	0	1	0,02
4	6	1	0,02
5	0	0	0,16
6	6	0	0,16
7	0	1	0,16
8	6	1	0,16

Кодируем факторы эксперимента:

- $X_1 = \alpha; X_{1\min} = 0^\circ \rightarrow -1; X_{1\max} = 6^\circ \rightarrow 1;$
- $X_2 = e; X_{2\min} = 0 \text{ мм} \rightarrow -1; X_{2\max} = 1 \text{ мм} \rightarrow 1;$
- $X_3 = \Delta; X_{3\min} = 0,02 \text{ мм} \rightarrow -1; X_{3\max} = 0,16 \text{ мм} \rightarrow 1;$
- $X_4 = Q; X_{4\min} = 0,0052 \text{ м}^3/\text{с} \rightarrow -1; X_{4\max} = 0,0072 \text{ м}^3/\text{с} \rightarrow 1;$
- $X_5 = i; X_{5\min} = 0,1 \rightarrow -1; X_{5\max} = 0,3 \rightarrow 1.$

Уравнение регрессии для рассматриваемой математической модели имеет вид:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_{13} X_1 X_3 + a_{14} X_1 X_4 + a_{23} X_2 X_3 + a_{24} X_2 X_4 + a_{34} X_3 X_4 + a_{35} X_3 X_5 + a_{45} X_4 X_5. \quad (2)$$

**Таблица 2.** Дробный факторный эксперимент для пяти факторов

**Table 2.** Fractional factorial experiment for five factors

Номер опыта Experiment number	Факторы Factors					Отклик Response $\bar{Y} = \bar{h}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	
1	-1	-1	-1	-1	+1	$y_1$
2	+1	-1	-1	-1	-1	$y_2$
3	-1	+1	-1	-1	-1	$y_3$
4	+1	+1	-1	-1	+1	$y_4$
5	-1	-1	+1	-1	+1	$y_5$
6	+1	-1	+1	-1	-1	$y_6$
7	-1	+1	+1	-1	-1	$y_7$
8	+1	+1	+1	-1	+1	$y_8$
9	-1	-1	-1	+1	+1	$y_9$
10	+1	-1	-1	+1	-1	$y_{10}$
11	-1	+1	-1	+1	-1	$y_{11}$
12	+1	+1	-1	+1	+1	$y_{12}$
13	-1	-1	+1	+1	+1	$y_{13}$
14	+1	-1	+1	+1	-1	$y_{14}$
15	-1	+1	+1	+1	-1	$y_{15}$
16	+1	+1	+1	+1	+1	$y_{16}$

Далее выполним полный факторный эксперимент по плану (табл. 2). Для повышения точности эксперимента проведем  $m = 3$  параллельных опытов. Результаты эксперимента и его обработка показана в табл. 3, 4. При обработке экспериментальных данных:

- определено среднее значение отклика  $\bar{y}$ ;
- оценена погрешность измерений в виде дисперсии  $S^2\{\bar{y}\}$ ;
- проверена гипотеза об однородности дисперсии (критерий Кохрена  $G_p$ );
- определена дисперсия воспроизводимости  $S_B^2$ ;
- рассчитано среднее квадратичное отклонение  $S_{\{ak\}}$ ;
- определены коэффициенты для математической модели ( $a_0, a_j, a_{ij}$ );
- определены относительные погрешности определения отклика  $\Delta E_1$  и коэффициента инжекции  $\Delta E_2$ . Значимость коэффициентов математической модели определена с помощью критерия Стьюдента  $t_{pk}$ . Гипотеза об адекватности математической модели проверена с помощью критерия Фишера  $F_p$ .

**Таблица 3.** Результаты измерений

**Table 3.** Measurement results

Номер опыта Experiment number	Факторы в натуральном масштабе Factors on a natural scale						Измеряемые параметры Measured parameters					
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$Q_i$	$\Delta p_{i1}$	$\Delta p_{i2}$	$\Delta p_{i3}$	$\Delta p_{P1}$	$\Delta p_{P2}$	$\Delta p_{P3}$
	градусы degrees	мм/мм		л/с l/s	единицы units	л/с l/s	кПа kPa					
1	0	0	0,02	5,24	0,3	1,57	0,252	0,266	0,279	0,532	0,566	0,611
2	6	0	0,02	5,24	0,1	0,52	0,530	0,558	0,586	0,807	0,858	0,927
3	0	1	0,02	5,24	0,1	0,52	0,433	0,456	0,478	0,710	0,756	0,816
4	6	1	0,02	5,24	0,3	1,57	0,137	0,144	0,151	0,418	0,444	0,480
5	0	0	0,16	5,24	0,3	1,57	0,188	0,197	0,207	0,468	0,497	0,537
6	6	0	0,16	5,24	0,1	0,52	0,400	0,421	0,442	0,678	0,721	0,779
7	0	1	0,16	5,24	0,1	0,52	0,340	0,358	0,376	0,618	0,658	0,711
8	6	1	0,16	5,24	0,3	1,57	0,089	0,094	0,099	0,370	0,394	0,426
9	0	0	0,02	7,22	0,3	2,17	0,461	0,512	0,563	1,056	1,112	1,190
10	6	0	0,02	7,22	0,1	0,72	0,954	1,060	1,166	1,577	1,660	1,776
11	0	1	0,02	7,22	0,1	0,72	0,833	0,925	1,018	1,449	1,525	1,632
12	6	1	0,02	7,22	0,3	2,17	0,255	0,283	0,312	0,839	0,883	0,945
13	0	0	0,16	7,22	0,3	2,17	0,348	0,387	0,426	0,938	0,987	1,056
14	6	0	0,16	7,22	0,1	0,72	0,773	0,859	0,945	1,386	1,459	1,561
15	0	1	0,16	7,22	0,1	0,72	0,630	0,700	0,770	1,235	1,300	1,391
16	6	1	0,16	7,22	0,3	2,17	0,166	0,185	0,203	0,746	0,785	0,840

**Таблица 4.** Факторный эксперимент

**Table 4.** Factorial experiment

Номер опыта Experiment number	Отклик/Response				$S^2\{\bar{y}\}$	$\bar{Y}$	$\Delta E_1, \%^*$	$\Delta E_2, \%^*$
	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$	$\bar{y}$				
1	0,4746	0,4697	0,4566	0,4670	0,0001	0,4612	2,49	0,69
2	0,6574	0,6504	0,6324	0,6467	0,0002	0,6457	1,33	1,74
3	0,6094	0,6030	0,5863	0,5996	0,0001	0,6035	1,58	1,74
4	0,3281	0,3246	0,3156	0,3228	0,0000	0,3124	4,13	0,69
5	0,4012	0,3969	0,3859	0,3947	0,0001	0,3923	3,18	0,69
6	0,5903	0,5841	0,5679	0,5808	0,0001	0,5767	1,69	1,74
7	0,5498	0,5440	0,5289	0,5409	0,0001	0,5346	1,94	1,74
8	0,2412	0,2387	0,2320	0,2373	0,0000	0,2435	5,93	0,69
9	0,4361	0,4604	0,4733	0,4566	0,0004	0,4612	1,28	0,50
10	0,6049	0,6386	0,6565	0,6333	0,0007	0,6457	0,70	1,26
11	0,5747	0,6066	0,6236	0,6016	0,0006	0,6035	0,78	1,26
12	0,3039	0,3208	0,3298	0,3181	0,0002	0,3124	2,10	0,50
13	0,3714	0,3920	0,4030	0,3888	0,0003	0,3923	1,62	0,50
14	0,5578	0,5888	0,6053	0,5840	0,0006	0,5767	0,83	1,26
15	0,5102	0,5386	0,5537	0,5341	0,0005	0,5346	0,99	1,26
16	0,2232	0,2356	0,2422	0,2337	0,0001	0,2435	3,01	0,50

Получена математическая модель для струйного насоса  $k = 1,31$ :

$$\hat{Y} = 0,4712 - 0,0267X_1 - 0,0477X_2 - 0,0345X_3 - 0,1189X_5. \quad (3)$$

Спланированный дробный факторный эксперимент необходим для проверки адекватности системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{h} &= \varphi_1^2 \frac{(\cos \alpha)^2}{K} \left[ \begin{aligned} &2\varphi_2 \sqrt{1 + \Delta h} + \\ &+ i^2 a^2 \frac{v_i}{v_p} \frac{2\varphi_2}{K - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 + \Delta h}}} - \\ &- (1 + ia)^2 \frac{v_c}{v_p} \frac{(2 - \varphi_3^2)}{K} \end{aligned} \right] - \Delta h; \\ \Delta h &= \frac{\varphi_1^2}{\varphi_4^2} \frac{i^2 a^2}{\left( K - \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta h}} \right)^2}; \\ \varphi_2 &= \left[ \begin{aligned} &1 + 0,77 \times \\ &\times \left[ \frac{\Delta}{d_2} + \frac{53,38\eta d_2 \left( 1 + \frac{0,13\tau_0 d_2^3}{\eta Q (1 + ia)} \right)^{0,25}}{\rho_c Q_p (1 + ia)} \right]^{0,25} \end{aligned} \right]^{-0,5}; \\ \varphi_3 &= \left[ \begin{aligned} &1 + 0,01375 (\sin \alpha_3)^{-1} \times \\ &\times \left[ \frac{\Delta}{d_2} + \frac{53,38\eta d_2 \left( 1 + \frac{0,13\tau_0 d_2^3}{\eta Q (1 + ia)} \right)^{0,25}}{\rho_c Q_p (1 + ia)} \right]^{0,25} \right]^{-0,5} \times \\ &\times \left[ \left( 1 - \left\{ \frac{d_2}{d_3} \right\}^4 \right) + \sin 2\alpha_3 \left[ 1 - \left\{ \frac{d_2}{d_3} \right\}^2 \right]^2 \right]^{-0,5}; \\ a &= \left( 1 + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \right), \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где  $\bar{h}$  – коэффициент напора струйного насоса [15];  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – коэффициенты потери кинетической энергии на участках струйного насоса [16];  $\alpha$  – поворот рабочего сопла, градусы [17];  $K = \left\{ \frac{d_2}{d_1} \right\}^2$  – геометрический коэффициент [18];  $d_1, d_2, d_3$  – диаметр на выходе рабочей насадки, камеры смешения, на выходе из диффузора соответственно, м [19];  $\Delta h$  – коэффициент потерь энергии в горловине эжектора [5];  $i$  – коэффициент инжекции [5];  $\varepsilon = \frac{2e}{d_2 - d_1}$  – относительное радиальное смещение сопла [10];  $e$  – эксцентриситет сопла, м [10];  $v_p, v_i, v_c$  – удельный объем рабочего, инжектируемого и смешанного потока соответственно, кг/м<sup>3</sup> [5];  $\Delta$  – гидравлическая шероховатость проточной части струйного насоса, м [11];  $\eta$  – абсолютная вязкость бурового раствора, Па·с;  $\tau_0$  –

динамическое напряжение сдвига бурового раствора, Па;  $Q$  – подача рабочей жидкости, м<sup>3</sup>/с [20];  $\rho_c = \frac{1}{v_c}$  – плотность смешанного потока, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_3$  – угол расширения диффузора, градусы.

При планировании эксперимента был ограничен пятью факторами с целью его упрощения до рационального объема (16 экспериментальных точек). Свойства рабочей/инжектируемой жидкости, такие как плотность, вязкость и динамическое напряжение сдвига, не вносились в эксперимент, для того чтобы не допустить увеличения объема эксперимента до 256 экспериментальных точек при полном факторном эксперименте. К тому же при анализе системы уравнений (4) было установлено, что максимальный напор струйного насоса, который работает на воде, всего на 2,5 % больше, чем напор струйного насоса, который работает на буровом растворе ( $\rho_c = 1400$  кг/м<sup>3</sup>,  $\tau_0 = 2$  Па,  $\eta = 0,006$  Па·с).

Экспериментальные данные обработаны с помощью критериев Кохрена, Стьюдента и Фишера.

По результатам экспериментального исследования выполнена верификация системы уравнений (4) для струйного насоса ( $K=1,31, d_2=15$  мм,  $d_3=1,7d, \alpha_3=4^\circ$ ). Экспериментальные точки и теоретические кривые показаны на рис. 5. Из графиков видно, что достоверность рассмотренной системы уравнений подтверждена высокой сходимостью расчетных величин с экспериментальными значениями (сходимость результатов в пределах относительной погрешности измерения, которая показана в табл. 4).

Основная погрешность датчика перепада давления  $\pm 0,1$  %. С учетом того, что предел измерения перепада давления равен 3 МПа, погрешность измерения датчика составляет  $\pm 3$  кПа. Данная погрешность справедлива для измерения перепада давления на струйном насосе. Но при измерении рабочего и полезного перепадов давления погрешность будет выше потому, что выносные мембраны датчиков давления расположены на разных уровнях. Разница уровней установки мембран равна 123 мм, что соответствует давлению водяного столба 1,2 кПа. Тогда суммарная погрешность измерения перепадов давления  $\Delta p_p$  и  $\Delta p_i$  будет равна  $\pm 4,2$  кПа. При обработке экспериментальных данных установлено, что максимальная погрешность измерения коэффициента напора равна  $\Delta E_1 = \pm 5,78$  %.

Основная погрешность датчика расхода  $\pm 1$  %. Максимальный измеряемый расход жидкости  $8,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с, тогда погрешность измерения датчика составляет  $\pm 8,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с. Установлено, что максимальная погрешность измерения коэффициента инжекции равна  $\Delta E_2 = \pm 1,74$  %.

Для переноса результатов экспериментального исследования на рабочий струйный насос используются критерии геометрического подобия, критерий Эйлера, число Рейнольдса, число Фруда.

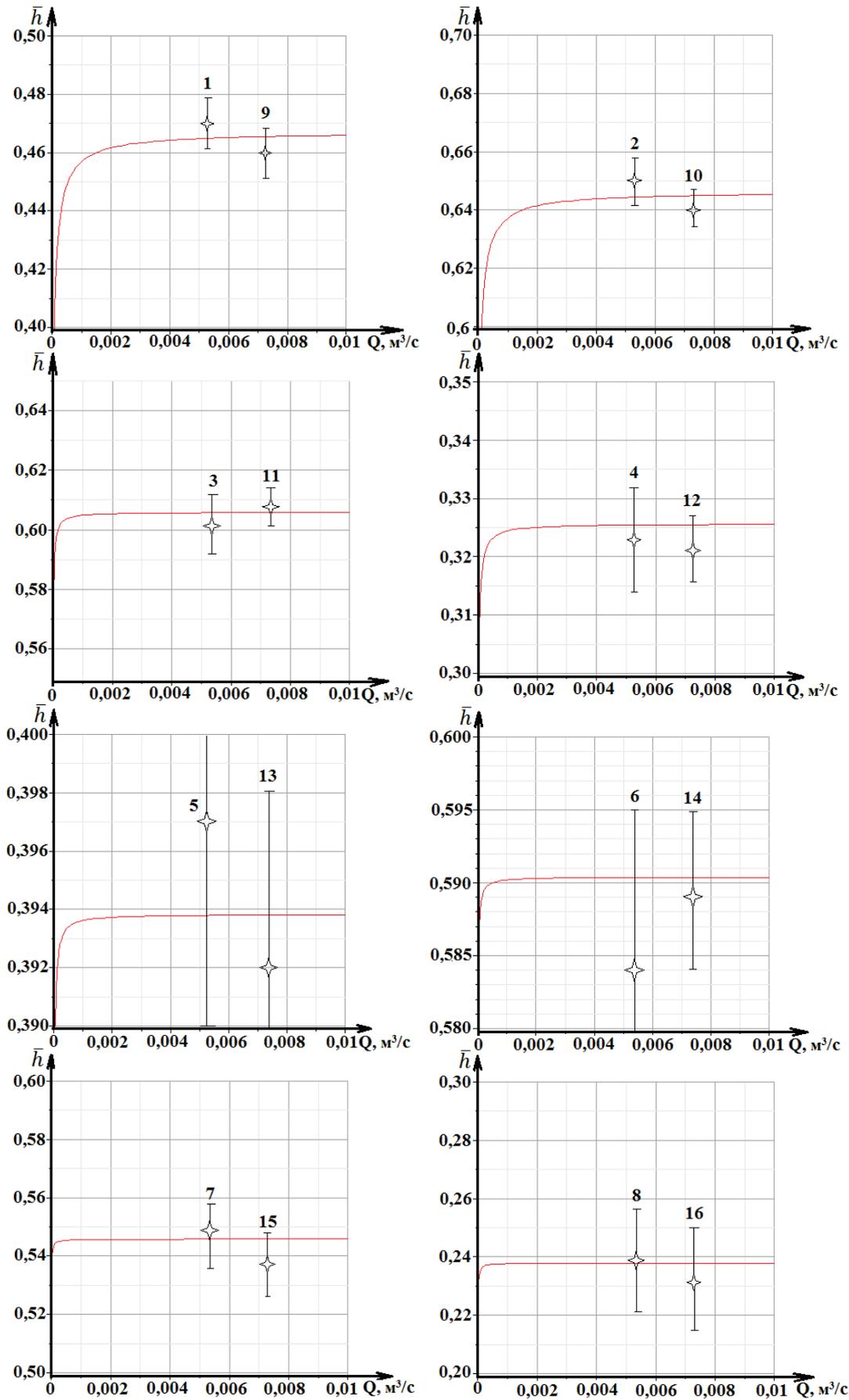


Рис. 5. Результаты эксперимента  
 Fig. 5. Results of the experiment

## Заключение

Экспериментально исследованы характеристики струйного насоса для наддолотного устройства для первичного вскрытия продуктивных пластов. По результатам эксперимента удалось подтвердить адекватность полученной ранее системы уравнений для расчета основных параметров наддолотного эжектора. Раз-

работанные уравнения напора эжектора позволяют определять рабочие параметры струйного насоса, применяемого в компоновке низа буровой колонны [12]. Данная методика может быть использована при разработке и проектировании подобных эжекторных систем для нефтегазовой промышленности, а также в учебном процессе специалистов для нефтегазового дела.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Application of artificial intelligence in predicting the dynamics of bottom hole pressure for under-balanced drilling: extra tree compared with feed forward neural network model / E.E. Okoro, D.I. Olatunji, P. Igbinedion et al. // *Petroleum*. – 2021. DOI: 10.1016/j.petlm.2021.03.001. EDN VVXMFPP.
2. Numerical simulation and optimization of injection rates and wells placement for carbon dioxide enhanced gas recovery using a genetic algorithm / S. Liu, B. Sun, H. Li et al. // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 280. – P. 124512. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124512. EDN FVUWXO.
3. Digital well completion solution to complement extreme reservoir contact drilling / K.F. Gordon Goh, V. Gottumukkala, S. Dyer et al. // *International Petroleum Technology Conference 2020*. – Dhahran, 13–15 January 2020. EDN EYOEMR.
4. Megalingam A., Babu V. A numerical investigation of the compressible flow in the ejector of a vapour ejector refrigeration system // *Progress in Computational Fluid Dynamics*. – 2020. – V. 20. – № 1. – P. 29–39. DOI: 10.1504/PCFD.2020.104704. EDN AZZZDL.
5. Applying a variable geometry ejector in a solar ejector refrigeration system / V. Van Nguyen, V. Dvorak, S. Varga et al. // *International Journal of Refrigeration*. – 2020. – V. 113. – P. 187–195. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.018. EDN SOXBPO.
6. Raza W., Ko G.S., Park Y.C. A study on the combined driven refrigeration cycle using ejector // *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. – 2021. – P. 2150004. DOI: 10.1142/S2010132521500048. EDN OEIYFJ.
7. Мельников А.П., Буглов Н.А. Обоснование параметров наддолотного струйного насоса для вскрытия продуктивного пласта // *Науки о Земле и недропользование*. – 2021. – Т. 44. – № 4 (77). – С. 433–440. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-4-433-440. EDN JSLYNS.
8. Андуганов А.А., Лягов А.В., Агзамов Ф.А. Разработка конструкции эжекторного струйного скважинного насоса для традиционного бурения // *Актуальные проблемы науки и техники-2019: сборник статей, докладов и выступлений XII Международной научно-практической конференции молодых ученых*. – Уфа, 01 июня 2019. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019. – С. 91–93. EDN KPUDSU.
9. Numerical investigation of the flow field and mass transfer characteristics in a jet slurry pump / Y. Qian, Y. Wang, Z. Fang et al. // *Processes*. – 2021. – V. 9. – № 11. DOI: 10.3390/pr9112053. EDN TYBDBV.
10. Zolper T.J., Cupp A.R., Smith D.L. Investigating the mixing efficiencies of liquid-to-liquid chemical injection manifolds for aquatic invasive species management // *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. – 2019. – V. 141. – № 3. – P. 031302. DOI 10.1115/1.4041361. EDN NTNFKV.

## Информация об авторах

**Мельников А.П.**, преподаватель, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

**Буглов Н.А.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой нефтегазового дела, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

11. Effect of lower surface roughness on nonlinear hydraulic properties of fractures / J. Li, X. Li, B. Zhang et al. // *Geofluids*. – 2021. – V. 2021. – P. 6612378. DOI: 10.1155/2021/6612378. EDN RDEFIK.
12. Эффективное вскрытие продуктивного пласта при бурении нефтяных и газовых скважин / В.В. Шайдаков, А.П. Мельников, К.В. Чернова, Г.Е. Коробков // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. – 2018. – № 4. – С. 26–34. DOI: 10.5510/OGP20180400368. EDN YURILZ.
13. Устройство для бурения скважин: пат. на полезную модель № 186817 У1 Российская Федерация, МПК E21B 7/00, F16F 5/00. № 2018138655; заявл. 02.11.2018; опубл. 05.02.2019. EDN DIZK M.
14. Мельников А.П., Шайдаков В.В., Семин В.И. Работа струйного насоса в нестационарных условиях забоя при бурении нефтяных и газовых скважин // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2018. – № 12S. – С. 30–35. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-12s-30-35. EDN YYFRCP.
15. Разработка перспективных технологий с применением эжекторных систем и сетчатых турбин / Ю.А. Сазонов, М.А. Мохов, И.В. Грязнова и др. // *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина*. – 2020. – № 4 (301). – С. 49–60. DOI: 10.33285/2073-9028-2020-4(301)-49-60. EDN NXHMIM.
16. Крыжанивский Е.И., Паневник Д.А. Повышение эффективности использования наддолотных струйных насосов // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. – 2020. – № 2. – С. 112–118. DOI: 10.5510/OGP20200200437. EDN UPHJXC.
17. Паневник А.В., Концур И.Ф., Паневник Д.А. Определение эксплуатационных параметров наддолотной эжекторной компоновки // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 3. – С. 70–73. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-3-70-73. EDN YSWARI.
18. Паневник Д.А., Паневник А.В. Исследование совместной работы струйного и плунжерного насосов с балансирным кривошипно-шатунным приводом // *Нефтяное хозяйство*. – 2020. – № 2. – С. 58–61. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-2-58-61. EDN QMHYPN.
19. Разработка компрессорных технологий с эжекторами высокого давления для добычи нефти и газа / Ю.А. Сазонов, М.А. Мохов, Х.А. Туманян и др. // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 5. – С. 78–82. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-5-78-82. EDN XNSWXJ.
20. Депрессионно-волновые и иные средства повышения приемистости и продуктивности скважин / Е.Г. Асеев, Н.А. Шапов, А.В. Лягов и др. // *Проектирование и эксплуатация нефтегазового оборудования: проблемы и решения: Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. – Уфа, 04–05 ноября 2004. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2004. – С. 8–13. EDN YYXOTZ.

Поступила: 04.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 07.02.2023 г.

UDC 622.24+621.694.2

## APPLICATION OF THE METHODOLOGY FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF A NEAR-BIT JET PUMP FOR TEMPORARY ISOLATION OF A PRODUCTIVE RESERVOIR

Alexander P. Melnikov<sup>1</sup>,  
m1a1p@yandex.ru

Nikolay A. Buglov<sup>1</sup>,  
bna@istu.edu

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

**Relevance.** The efficiency of oil and gas wells depends on the quality of work at the stage of completion of wells, namely, on the performance of the primary opening of the productive reservoir. One of the main tasks when opening a productive reservoir is to preserve the natural properties of a productive reservoir. This problem can be solved by temporarily isolating the formation by colmatation. The idea of using a jet pump in the layout of the bottom of the drill string for crushing the sludge and further feeding it to the colmatator in order to temporarily isolate the productive reservoir is quite interesting. This makes it possible to replace the metal-intensive ground equipment that is used for such tasks.

**Purpose:** checking the adequacy of the previously obtained dependencies of the jet pump pressure on the injection coefficient, angular and eccentric mixing of the working nozzle, as well as on the roughness of the flow part of the mixing chamber and the diffuser.

**Object:** near-bit jet pump with angular and eccentric displacement of the working nozzle relative to the central axis of the mixing chamber.

**Methods:** factorial experimental study of the characteristics of a high-pressure jet pump using a developed laboratory installation.

**Results.** The authors have proposed the method of experimental investigation of the main characteristics of the near-bit jet pump. The jet pump is designed for crushing the injected sludge directly in the mixing chamber, and further feeding it to the colmatator to provide temporary isolation of the bottomhole zone during the initial opening of the formation. The destruction of the sludge occurs with the help of a working jet, which is directed at the wall of the mixing chamber. The flow direction is set by the angular and eccentric displacement of the jet pump nozzle. The results of the study confirmed the adequacy of the previously obtained pressure characteristics of a high-pressure jet pump. The pressure characteristics take into account the geometric parameters of the flow part of the near-bit jet pump.

### Key words:

Research methodology, factorial experiment, high-pressure jet pump, adequacy check, pressure coefficient, laboratory bench, experimental data.

### REFERENCES

- Okoro E.E., Obomanu T., Sanni S.E., Olatunji D.I., Igbinedion P. Application of artificial intelligent in predicting the dynamics of bottom hole pressure for under-balanced drilling: extra tree compared with feed forward neural network model. *Petroleum*, 2021. DOI: 10.1016/j.petlm.2021.03.001.
- Liu S., Sun B., Li H. Numerical simulation and optimization of injection rates and wells placement for carbon dioxide enhanced gas recovery using a genetic algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 280, p. 124512.
- Gordon Goh F., Gottumukkala V., Dyer S. Digital well completion solution to complement extreme reservoir contact drilling. *K. International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, 13–15 January 2020.
- Megalingam A., Babu V. A numerical investigation of the compressible flow in the ejector of a vapour ejector refrigeration system. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 29–39. DOI: 10.1504/PCFD.2020.104704.
- Van Nguyen V., Dvorak V., Varga S. Applying a variable geometry ejector in a solar ejector refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 2020, vol. 113, pp. 187–195.
- Raza W., Ko G.S., Park Y.C. Study on the combined driven refrigeration cycle using ejector. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 2021, pp. 2150004. DOI: 10.1142/S2010132521500048.
- Melnikov A.P., Buglov N.A. Parameter substantiation of supra bit jet pump for productive formation opening. *Earth Sciences and subsoil use*, 2021, vol. 44, no. 4 (77), pp. 433–440. In Rus.
- Anduganov A.A., Lyagov A.V., Agzamov F.A. Razrabotka konstruktsii ezheksionnogo struyynogo skvazhinnogo nasosa dlya traditsionnogo bureniya [Design of ejection of the jet well pump for conventional drilling]. *Aktualnye problemy nauki i tekhniki-2019. Sbornik statey, dokladov i vystupleniy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh* [Actual problems of science and technology. Collection of articles, reports and speeches of the XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists]. Ufa, Ufa State Petroleum Technical University Publ., 2019. pp. 91–93.
- Qian Y., Wang Y., Fang Z. Numerical investigation of the flow field and mass transfer characteristics in a jet slurry pump. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 11. DOI: 10.3390/pr9112053.
- Zolper T.J., Cupp A.R., Smith D.L. Investigating the mixing efficiencies of liquid-to-liquid chemical injection manifolds for aquatic invasive species management. *Journal of Fluids Engineering*, 2019, vol. 141, no. 3, P. 031302.
- Li J., Li X., Zhang B. Effect of lower surface roughness on nonlinear hydraulic properties of fractures. *Geofluids*, 2021, vol. 2021, pp. 6612378.
- Shaidakov V.V., Melnikov A.P., Chernova K.V., Korobkov G.E. Efficient drilling in the oil and gas wells drilling. *SOCAR Proceedings*, 2018, no. 4, pp. 26–34. In Rus.
- Melnikov A.P., Buglov N.A., Ivanishin V.M., Akchurin R.H. *Ustroystvo dlya bureniya skvazhin* Patent RF no. 186817 U, 2019.
- Melnikov A.P., Shaidakov V.V., Semin V.I. Jet pump operation in a bottom hole's non-stationary conditions when drilling oil and gas wells. *Construction of oil and gas wells on land and sea*, 2018, no. 12S, pp. 30–35. In Rus.
- Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V. Development of advanced technologies dedicated to ejector systems and mesh turbines. *Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2020, no. 4 (301), pp. 49–60. In Rus.
- Kryzhanivsky E.I., Panevnik D.A. Improving use efficiency above bit jet pumps. *Scientific works of NIPi Neftegaz SOCAR*, 2020, no. 2, pp. 112–118. In Rus.
- Panevnik A.V., Kotsur I.F., Panevnik D.A. Determination of operational parameters of near-bit ejector assembly. *Oil industry*, 2018, no. 3, pp. 70–73. In Rus.

18. Panevnik D.A., Panevnik A.V. Investigation of the joint work of a jet and plunger pumps with a balancing crank-rod drive. *Oil industry*, 2020, no. 2, pp. 58–61. In Rus.
19. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Tumanyan H.A. The development of compressor technologies with high pressure ejectors for oil and gas production. *Oil industry*, 2018, no. 5, pp. 78–82. In Rus.
20. Aseev E.G., Shamov N.A., Lyagov A.V. Depressionno-volnovye i inye sredstva povysheniya priemistosti i produktivnosti skvazhin [Depression-wave and other means of increasing the pick-up and productivity of wells]. *Proektirovanie i ekspluatatsiya nefte-*

*gazovogo oborudovaniya: problemy i resheniya. Materialy Vse-rossiyskoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii* [Design and operation of oil and gas equipment: problems and solutions. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Ufa, Ufa State Oil Technical University Publ., 2004. pp. 8–13.

*Received: 4 November 2022.*

*Reviewed: 7 February 2023.*

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

*Alexander P. Melnikov*, teacher, Irkutsk National Research Technical University.

*Nikolay A. Buglov*, Cand. Sc., head of the Oil and gas Engineering Department, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 622.271.1, 622.271.6

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОТБОЙКИ ПОРОД ГИДРОМОНИТОРОМ ПРИ НАЛИЧИИ В ЕГО СТРУЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Шкаруба Наталья Александровна<sup>1</sup>,  
NShkaruba@sfu-kras.ru

Набижанов Жасурбек Ильхомович<sup>1</sup>,  
nabyjohny@gmail.com

Косолапов Александр Иннокентьевич<sup>1</sup>,  
AKosolapov@sfu-kras.ru

Кирсанов Александр Константинович<sup>1</sup>,  
AKirsanov@sfu-kras.ru

Тешаев Умарджон Риёзидинович<sup>2</sup>,  
Umar.teshaev@mail.ru

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

<sup>2</sup> Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,  
Республика Таджикистан, 734042, г. Душанбе, пр. академиков Раджабовых, 10.

**Актуальность.** Гидромониторы нашли широкое применение при разработке россыпных месторождений в технологических схемах с обратным водоснабжением. В настоящее время в отработку вовлекают месторождения с более сложными горно-геологическими условиями залегания. Для россыпей это, прежде всего, весьма значительное содержание глины во вмещающих породах и песках. Гидравлический способ разработки месторождений, в частности гидромониторная отбойка пород, подразумевает обратное водоснабжение, когда технологическую воду забирают из специальных прудов-отстойников. Однако высокое содержание глины в размываемых породах, тонкодисперсные частицы которой имеют весьма длительный период осаждения в воде отстойника, значительно усложняет применение этой технологии. Известны решения для отработки месторождений в подобных условиях с управляемым содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора, где расчет параметров отбойки пород гидромонитором предложено производить при помощи разработанной математической модели. Дальнейшее развитие предложенных решений возможно за счет внедрения в технологический процесс элементов автоматизации, в частности искусственных нейронных сетей.

**Цель:** оценить перспективы применения технологии искусственного интеллекта для отбойки пород гидромонитором при наличии в его струе тонкодисперсных частиц.

**Методы:** внедрение технологий искусственного интеллекта на основе искусственных нейронных сетей в технологический процесс разработки россыпных месторождений с содержанием глины во вмещающих породах и песках.

**Результаты.** Выполнена оценка перспектив применения технологии искусственного интеллекта для управления процессом отбойки с использованием многослойной нейронной сети.

**Выводы.** Предложенная технология позволяет оперативно управлять производительностью отбойки пород гидромонитором, регулировать расход электроэнергии, а также улучшить качество гравитационного обогащения полезного ископаемого за счет подачи на шлюзы воды с допустимым содержанием тонкодисперсных частиц, что в итоге ведет к сокращению потерь полезного ископаемого и уменьшению себестоимости процесса отбойки пород гидромонитором и всей технологии в целом, а также к улучшению показателей извлечения полезного компонента.

### Ключевые слова:

месторождение, гидромонитор, гидромониторная отбойка, глинистый массив, тонкодисперсные грунтовые частицы, производительность отбойки, технологические решения, методика, искусственный интеллект, искусственные нейронные сети.

### Введение

Значительная часть россыпных месторождений золота в России расположена в Красноярском крае. Большинство из них отрабатывают средствами гидромеханизации, в частности, с применением гидромониторной отбойки.

Однако общеизвестное повсеместное истощение месторождений с благоприятными горно-геологическими условиями приводит к тому, что в отработку вовлекают россыпи со сложными условиями залегания, в

частности, с большим содержанием глины во вмещающих породах и песках.

В таких условиях в отстойниках, а следовательно, и в напорной воде гидромонитора неизбежно накапливаются взвешенные тонкодисперсные частицы глины. Их содержание в значительной мере влияет на реологические свойства воды и силу удара струи о забой [1], а также на необходимый объем воды в отстойнике обратного водоснабжения и, как следствие, на количество горно-капитальных работ [2].

Известны исследования [2], на основе которых предложены решения по отбойке пород с управляемым содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора, где изменение производительности отбойки пород (которое принимают прямо пропорциональным изменению силы удара струи гидромонитора о забой) предложено определять и прогнозировать исходя из содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде прудатстойника в течение рабочего сезона путем проведения периодических замеров или данных, полученных ранее.

Влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц и других факторов, таких как: диаметр насадки, напор на насадке и расстояние установки гидромонитора, на силу удара гидромониторной струи о забой можно представить в виде функции  $P=f(\rho; L; H_0; d_n)$ . Для прогнозирования ее значения предложено использовать следующую эмпирическую формулу [1, 2]:

$$P = A\rho + \frac{L}{10} \cdot 100^{-3} \left( B \frac{H_0^2}{100} + C \frac{H_0}{10} + D \right) + E + F, \quad (1)$$

где  $P$  – сила удара гидромониторной струи о забой;  $\rho$  – плотность воды, зависящая от содержания взвешенных частиц;  $L$  – расстояние от насадки гидромонитора до забоя;  $H_0$  – напор воды;  $A, B, C, D, E, F$  – значения эмпирических коэффициентов модели (2), (3).

Для расчета коэффициентов математической модели по результатам лабораторных и промышленных экспериментов получены формулы:

$$A, B, C, D, E = a \frac{d_n^2}{100} + b \frac{d_n}{10} + c, \quad (2)$$

$$F = \frac{H_0}{10} \left( 0,23 \frac{d_n}{10} - 0,81 \right), \quad (3)$$

где  $d_n$  – диаметр насадки гидромонитора;  $a, b, c$  – эмпирические коэффициенты.

Эмпирические коэффициенты уравнения (2) представлены в таблице.

Таблица. Эмпирические коэффициенты

Table. Empirical coefficients

Параметр модели (2) Model parameters (2)	$a$	$b$	$c$
$A$	-0,36	5,31	-7,63
$B$	-1,79	22,46	-66,16
$C$	54,7	-687,4	2025
$D$	-414,3	525,5	15860
$E$	0,45	-6,25	10,62

При использовании описанного подхода для текущего момента времени точное содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора не известно, а параметры отбойки принимают усредненными.

#### Выбор типа нейронной сети

В настоящее время наметилась заметная тенденция внедрения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в различных отраслях промышленности. Одной из основных технологий ИИ являются нейронные сети, которые имеют множество различных видов и продолжают разрабатываться ведущими учеными и инженерами Российской Федерации и других стран. Также увеличивается количество вариантов реализации сетей.

При внедрении искусственных нейронных сетей в процесс необходимо выбрать такую, которая максимально подходит для решения поставленной задачи, так как разные нейронные сети обладают различными качествами.

На текущий момент для выбора существует три вида нейронных сетей: однослойный перцептрон, сверточные сети и многослойные сети.

Для реализации выбора нейронной сети в рассматриваемых условиях технологии добычи полезных ископаемых отметим основные характеристики этих сетей.

**Однослойный перцептрон.** Данная сеть способна решать простые задачи. Искусственный нейрон (базовый процессорный элемент) является основой любой искусственной нейронной сети (рис. 1) [3].

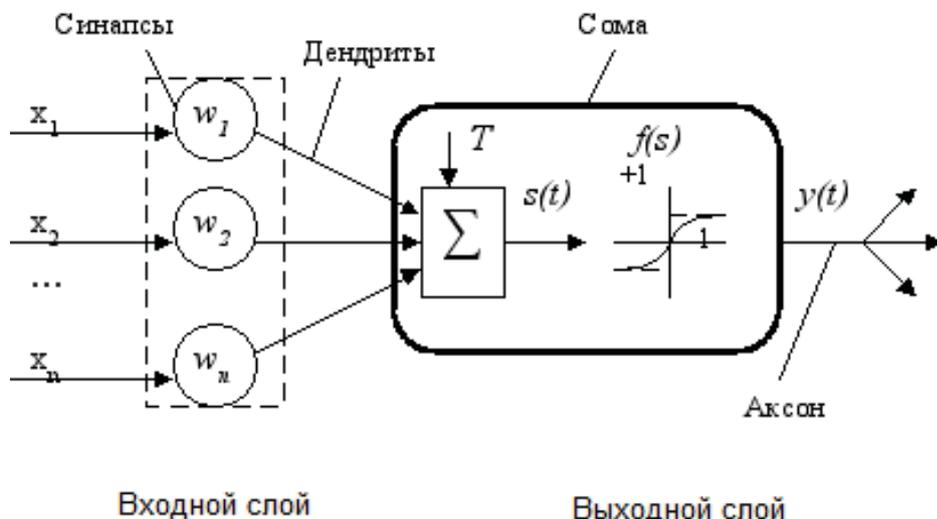


Рис. 1. Схема искусственного нейрона

Fig. 1. Scheme of an artificial neuron

Сверточные нейронные сети (рис. 2). Это сети, которые показали наилучшие результаты в распознавании изображений, речи, образов, видеонализа и т. д. Преимуществом сверточных сетей является их

свойства инвариантности [4, 5]. Однако для рассматриваемых условий они не подходят, так как не применяются для решения задач нейросетевого управления.

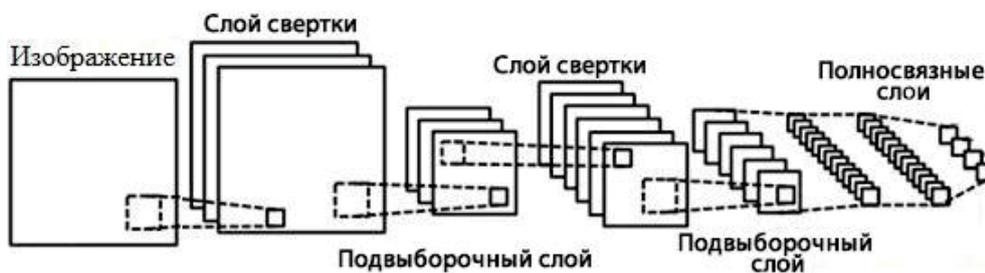


Рис. 2. Схема сверточной сети

Fig. 2. Convolutional network diagram

Многослойные нейронные сети. Способны решать более сложные задачи в отличие от однослойного персептрона за счет наличия скрытого или скрытых слоев. Для обновления значений весов используются методы, основанные на алгоритме обратного распространения ошибки. Многослойные нейронные сети применяют для решения задач классификации, аппроксимации функций, прогнозирования временных рядов, а также в системах автоматического управления [6, 7].

Нейроны представляют собой относительно простые, однотипные элементы, имитирующие работу нейронов мозга. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием, возбужден или заторможен, по аналогии с нервными клетками головного мозга [3].

Искусственный нейрон, так же как и его естественный прототип, имеет группу синапсов – входов, которые соединены с выходами других нейронов, а также аксон – выходную связь данного нейрона, откуда сигнал возбуждения или торможения поступает на синапсы других нейронов [8].

Исходя из перечисленных характеристик нейронных сетей для управления процессом отбойки пород гидромонитором рекомендуется использовать многослойные нейронные сети.

#### Интеграция искусственного интеллекта с технологией отбойки пород гидромонитором

С учетом этого описанную выше технологию [2] возможно дополнить применением ИИ, реализованного в виде искусственной нейронной сети. Это позволит устранить или минимизировать человеческий фактор в процессе замеров и автоматизировать процесс за счет машинного сбора данных и дальнейшей их обработки с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) [9].

Предлагаемая технологическая схема применима на добычных и вскрышных работах, а также для размыва пород в разрушенном состоянии, например, при размыве на гидровашгерде.

Работу ИНС предполагается осуществлять на базе математической модели (1) [1, 2], где изменяемыми параметрами являются  $d_n$ ,  $\rho$ ,  $H_0$  и  $L$ , которые поступают на вход сети, а выходом является сила удара

гидромониторной струи о забой  $P$ . Данные о параметрах гидромониторной установки в ИНС поступают следующим образом:

- диаметр насадки задается оператором при ее установке, перед началом работы гидромонитора;
- расстояние установки гидромонитора определяется во время работы гидромонитора при помощи лазерного дальномера в режиме реального времени и передается для обработки в ИНС;
- напор на насадке устанавливается при помощи манометра на подводящем трубопроводе гидромонитора (поскольку установить манометр на насадке гидромонитора невозможно по техническим причинам, перед запуском работ по отбойке данные по напору калибруют).

Содержание взвешенных частиц определяется при помощи мутномеров, установленных в пруду-отстойнике и в подводящем трубопроводе гидромонитора.

Информация с указанных датчиков поступает в персональный компьютер и обрабатывается ИНС, которая получает указанные входные параметры и на их основе дает рекомендации оператору для корректировки режима работы.

Отличительной особенностью указанных технологических решений является подача на гидромонитор технологической воды с заданным количеством тонкодисперсных грунтовых частиц в ее составе. Накопление этих частиц в технологической воде происходит естественным путем в течение промывочного сезона.

Для добычных работ рекомендуется ограничивать содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде до 60 г/л [10], так как большие содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде негативно сказываются на процессе обогащения с применением гравитационных методов (шлюзов) [2, 10–16].

Для проведения вскрышных работ содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде рекомендуется ограничивать значениями 100 г/л, что обусловлено в основном резким увеличением абразивного износа деталей машин и механизмов [2].

Входной параметр  $\rho$  (плотность воды, зависящая от содержания взвешенных частиц). Автоматическая регулировка содержания взвешенных тонкодисперсных глинистых частиц может осуществляться следующим образом. На стадии проектирования (либо начала работ по предлагаемой технологической схеме) предусматривается строительство двух емкостей с технологической водой [2], одна из которых представляет собой пруд-отстойник емкостью, определяемой с помощью уравнения (4). Для этого задают требуемое содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в отстойнике ( $c=60$  г/л при добычных работах и 100 г/л при ведении вскрышных работ) и решают уравнение (4) относительно  $V_o$  [2, 10, 17].

$$C_{\phi} = 10V_n \rho_{\tau} \frac{b}{V_o}, \text{ г/л}, \quad (4)$$

где  $C_{\phi}$  – содержание глинистых частиц в технологической воде на конец эксплуатации пруда-отстойника;  $V_n$  – количество промытых грунтов (хвостов), поступающих в гидравлический отвал в породной массе за весь период его эксплуатации,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_{\tau}$  – плотность самых мелких фракций,  $\text{т/м}^3$ ;  $b$  – суммарный выход фракций менее предельного размера, %;  $V_o$  – объем воды в отстойнике,  $\text{м}^3$ .

Вторая емкость – это емкость с технической чистой водой. Обе емкости соединены между собой трубным сливом с механическим затвором, управляемым при помощи ИНС.

Во время производства работ с применением гидромонитора ИНС посредством датчиков отслеживает и анализирует содержание взвешенных глинистых частиц в напорной воде. При достижении критических значений содержания взвешенных глинистых частиц на привод затвора трубого слива между емкостями с технологической водой поступает сигнал «открыть затвор», и в пруд-отстойник подается технически чистая вода из специальной емкости, за счет чего снижается концентрация взвешенных глинистых частиц в напорной воде.

При достижении приемлемых значений содержания взвешенных глинистых частиц ИНС подает сигнал «закрывать затворку трубого слива».

Входной параметр  $L$  (расстояние от насадки гидромонитора до забоя). Непрерывное отслеживание и анализ расстояния от насадки гидромонитора до забоя при помощи ИНС позволит наиболее эффективно использовать энергию струи воды при отбойке.

За счет того, что этот параметр контролируется с помощью ИНС, оператору подается сигнал о необходимости передвижения гидромонитора. Также гидромонитор может быть установлен на специальную подвижную площадку с гидроприводом (особенно это актуально в условиях размыва пород на гидровашгерде). В этом случае ИНС также может управлять расстоянием установки гидромонитора от забоя в режиме реального времени.

Входной параметр  $H_o$  (напор воды). Контроль и анализ напора на насадке гидромонитора при помощи ИНС, кроме оптимизации работы гидромонитора по отбойке пород, позволит снизить расход электроэнер-

гии насосной установкой. Датчики напора передают информацию на ИНС, которая в свою очередь регулирует напряжение на насосной установке, таким образом оптимизируя расход электроэнергии.

Выходной параметр  $P$  (сила удара гидромониторной струи о забой). Характеризует интенсивность отбойки массива пород. За счет контроля входных и выходных параметров при помощи ИНС оператор имеет возможность в реальном времени изменять входные параметры, достигая максимальных показателей эффективности процесса отбойки пород гидромонитором.

Внедрение ИНС в технологический процесс добычи полезного ископаемого предполагает в первую очередь подготовку данных. Для того чтобы построить ИНС, которая способна решать реальные задачи технологического процесса, необходимо пройти следующие этапы [18, 19]:

- сбор данных;
- подготовка данных;
- построение архитектуры ИНС;
- анализ качества и интерпретация модели ИНС.

Таким образом, в первый сезон работы с применением предлагаемой технологической схемы будет осуществляться сбор данных для обучения ИНС и ее последующего запуска. Предприятие в этот период будет работать по традиционной технологии.

В то же время, если организация, ведет разработку нескольких месторождений, отлаживать ИНС можно только на одном из них, после чего использовать уже настроенную ИНС на остальных. Либо возможно приобретение готовой отлаженной ИНС и ее внедрение в технологический процесс.

Принципиальная схема настройки ИНС выглядит следующим образом. В технологической цепочке определяют параметры, которые необходимо использовать для обработки данных.

Эти данные получают в производственных условиях (при необходимости – на лабораторных стендах) и формулируют специфические черты задачи непрерывного контроля и анализа. В рассматриваемом случае это сила удара струи гидромонитора о забой (то есть изменение производительности отбойки пород гидромонитором).

Согласно уравнению (1), параметрами, влияющими на силу удара струи гидромонитора о забой  $P$ , являются:  $P$  – сила удара гидромониторной струи о забой;  $\rho$  – плотность воды, взаимосвязанная с содержанием взвешенных частиц;  $L$  – расстояние от насадки гидромонитора до забоя;  $H_o$  – напор воды;  $d_n$  – диаметр насадки гидромонитора.

Таким образом, для адекватной настройки работы ИНС необходимо:

- получение данных для каждого независимого входного параметра;
- получение высокой точности определения силы удара гидромониторной струи о забой;
- создание инструментов для предварительной обработки данных, до подачи на вход ИНС;

- достижение высокой скорости обработки данных в режиме реального времени (минимальная задержка);  
Во время сбора данных необходимо определить тип данных, которые используются в технологическом процессе. В данном случае в технологическом процессе выделяют следующие типы данных:
- сила удара струи гидромонитора о забой;
- содержание взвешенных тонкодисперсных частиц в напорной воде гидромонитора (плотность напорной воды);
- расстояние от насадки гидромонитора до забоя;
- напор воды на насадке гидромонитора;
- диаметр насадки гидромонитора.

В данном случае тип данных – количественные. Для всех данных обязательно указывается диапазон значений. Определение типов данных является важным моментом при подготовке к процессу обучения ИНС.

После обработки данных необходимо подготовить их для обучения ИНС, обычно это создание векторного пространства признаков, то есть приведение всех данных в численную форму, а также процесс масштабирования данных, например, приведение к интервалу  $[0;1]$  или  $[-1;1]$ . Весь этот процесс можно описать как отображение данных в формат, пригодный для обучения модели ИНС.

*Построение архитектуры ИНС.* Вначале необходимо выбрать модель нейронной сети, отвечающую всем требованиям технологического процесса (входные и выходные параметры) и специфическим чертам задачи. Структура сети должна максимально эффективно использовать исходные данные. Существует множество алгоритмов обучения ИНС. Для увеличения точности и скорости обработки необходимо настраивать сеть и заново проводить обучение, используя соответствующий алгоритм обучения [20].

Внедрение ИНС в производство – это сложный процесс, который может продлиться от года до нескольких лет. Достаточно много времени займет сбор и подготовка данных. Также вся работа сопровождается специалистами и экспертом в области ИНС.

Указанные технологические решения позволяют в автоматическом режиме отслеживать и управлять производительностью отбойки пород гидромонитором, а также контролировать качество гравитационного обогащения за счет подачи на шлюзы воды с допустимым содержанием тонкодисперсных частиц, сократить потери полезного ископаемого.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кисляков В.Е., Шкаруба Н.А., Катышев П.В. Исследование силы удара струи гидромонитора о забой // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 268–275.
2. Шкаруба Н.А. Разработка технологии отбойки пород гидромонитором при наличии в его струе частиц различной крупности: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2020. – 142 с.
3. Rojas R. Neural networks: a system introduction. – Berlin: Springer, 1996. – 509 p.

#### Выводы

Известна технология, учитывающая содержание тонкодисперсных глинистых частиц в напорной воде, позволяющая увеличить производительность отбойки пород гидромонитором. Однако нерегулируемое управление содержанием взвешенных частиц снижает ее эффективность.

Устранение указанных недостатков и совершенствование этой технологии в целом возможно за счет ее автоматизации. В частности, путем внедрения искусственного интеллекта, реализованного в виде искусственной нейронной сети.

Исходя из анализа полученных характеристических данных в рассматриваемом варианте технологии отбойки пород предпочтение следует отдавать многослойным нейронным сетям.

Работу искусственной нейронной сети предполагается осуществлять на базе математической модели, разработанной для совершенствуемой технологии, где входными параметрами являются  $\rho$  (плотность воды, взаимосвязанная с содержанием взвешенных частиц);  $L$  (расстояние от насадки гидромонитора до забоя);  $H_0$  (напор воды);  $d_n$  (диаметр насадки гидромонитора). Эти параметры поступают в искусственную нейронную сеть с автоматических датчиков. Выход нейронной сети –  $P$  (сила удара гидромониторной струи о забой).

После обработки данные подготавливают для обучения искусственной нейронной сети: приводят все данные в численную форму, а также масштабируют их, то есть приводят к интервалу  $[0;1]$  или  $[-1;1]$ .

Предложенная технология позволяет оперативно управлять производительностью отбойки пород гидромонитором, регулировать расход электроэнергии, а также улучшить качество гравитационного обогащения полезного ископаемого за счет подачи на шлюзы воды с допустимым содержанием тонкодисперсных частиц, что в итоге ведет к сокращению потерь полезного ископаемого и уменьшению себестоимости процесса отбойки пород гидромонитором и всей технологии в целом, а также к улучшению показателей извлечения полезного компонента.

Рассмотренные технологические решения применимы для ведения работ при содержании глины во вмещающих породах и песках. Приемлемое содержание тонкодисперсных глинистых частиц в напорной воде гидромонитора (60 и 100 г/л [10]) отслеживается в автоматическом режиме и анализируется при помощи искусственной нейронной сети.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90112.*

4. Haykin S. Neural networks and learning machines. 3rd ed. – New York: Prentice Hall/Pearson, 1999. – 938 p.
5. Коул А., Ганджу С., Казам М. Искусственный интеллект и компьютерное зрение. Реальные проекты на Python, Keras и TensorFlow. – СПб.: Питер, 2022. – 608 с.
6. Smola A., Vishwanathan S. V. N. Introduction to machine learning. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 234 p.
7. Koul A., Ganju S., Kasam M. Practical deep learning for cloud, mobile, and edge: real-world AI & computer-vision projects using Python, Keras & Tensorflow. – USA: 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, 2020. – 620 p.

8. Jung A. Machine learning: the basics. – Singapore: Springer, 2022. – 280 p.
9. Дейтел П.Дж., Дейтел Х. Python. Искусственный интеллект, большие данные и облачные вычисления. – СПб.: Питер, 2020. – 860 с.
10. Кисляков В.Е. Предельная загрязненность технологической воды при разработке россыпных месторождений золота // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – С. 148–156.
11. О контроле мутности технологической воды на драгах и способе осветления воды в дражном разрезе при бессточной схеме водоснабжения / С.М. Шорохов, А.А. Зуйков, В.М. Селезнев и др. // Колыма. – 1973. – № 11. – С. 27–28.
12. Обогащение золотосодержащих песков и конгломератов / О.В. Замятин, А.Г. Лопатин, Н.П. Санникова и др. – М.: Недра, 1975. – 264 с.
13. Водоснабжение и очистка сточных вод при разработке россыпных месторождений / В.В. Назаров, Ю.М. Чикин, В.Р. Лицаев и др. – М.: Недра, 1975. – 184 с.
14. Назаров В.В., Колюкова А.Т. Работа драги в «глухом» забое // Колыма. – 1969. – № 8. – С. 7–8.
15. Барабанов В.Д. Совершенствование технологии извлечения золота и платины из россыпных месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1971. – 26 с.
16. Мязин В.П. Изыскание эффективных способов снижения мутности воды в дражном разрезе при разработке глинистых россыпей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 1975. – 24 с.
17. Кисляков В.Е. Расчет отстойников оборотного водоснабжения при разработке россыпей. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1988. – 176 с.
18. Cielen D., Meysman Arno D.B., Mohamed A. Introducing data science. – New York, USA: Publications Co., 2016. – 322 p.
19. Watt J., Borhani R., Katsaggelos A.K. Machine learning refined: foundations, algorithms, and applications. – New York: Cambridge University Press, 2020. – 593 с.
20. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: модели и концепции эволюционной кибернетики. – М.: Ленанд, 2019. – 224 с.

Поступила: 26.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 19.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Шкаруба Н.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры подземной разработки Сибирского федерального университета.

**Набижанов Ж.И.**, кандидат технических наук, инженер-исследователь научно-исследовательской части Сибирского федерального университета.

**Косолапов А.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой открытых горных работ Сибирского федерального университета.

**Кирсанов А.К.**, кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного и подземного строительства Сибирского федерального университета.

**Тешаев У.Р.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой инженерной геодезии, маркшейдерии и картографии Таджикского технического университета имени академика МС. Осими.

UDC 622.271.1, 622.271.6

## EVALUATION OF PROSPECTS FOR APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGY FOR BREAKING ROCKS BY A HYDROMONITOR WITH FINE PARTICLES IN ITS JET

**Natalya A. Shkaruba<sup>1</sup>,**  
NShkaruba@sfu-kras.ru

**Zhasurbek I. Nabizhanov<sup>1</sup>,**  
nabyjohny@gmail.com

**Alexander I. Kosolapov<sup>1</sup>,**  
AKosolapov@sfu-kras.ru

**Alexander K. Kirsanov<sup>1</sup>,**  
AKirsanov@sfu-kras.ru

**Umarjon R. Teshae<sup>2</sup>,**  
Umar.teshaev@mail.ru

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

<sup>2</sup> Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi,  
10, Academician Radjabov avenue, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan.

**Relevance.** Hydraulic monitors are widely used in the development of alluvial deposits in technological schemes with circulating water supply. Currently, deposits with more complex mining and geological conditions of occurrence are involved in mining. For placers, this is, first of all, a very significant content of clay in the host rocks and sands. When using the hydraulic method of field development, in particular, during hydromonitor breaking of rocks, during circulating water supply, process water is taken from special settling ponds. However, due to the high content of clay in eroded rocks, fine particles of which have a very long period of settling in the water of the sump, this technology is experiencing significant difficulties. There are known solutions for the development of deposits in similar conditions with a controlled content of fine soil particles in the pressurized water of the hydromonitor, where the calculation of the parameters of rock breaking by the hydromonitor is proposed to carry out using the developed mathematical model. Further development of the proposed solutions is possible through the implementation of automation elements into the technological process, in particular, artificial neural networks.

**Purpose:** to assess the prospects for using artificial intelligence technology for breaking rocks with a hydromonitor with fine particles in its jet  
**Methods:** implementation of artificial intelligence technologies based on artificial neural networks in the technological process of developing alluvial deposits with clay content in host rocks and sands.

**Results.** This article assesses the prospects for using artificial intelligence technology to control the breaking process using a multilayer feed-forward neural network.

**Conclusions.** The proposed technology allows quickly managing the productivity of rock breaking with a hydraulic monitor, regulating power consumption, and improving as well the quality of gravitational enrichment of a mineral by supplying water with an acceptable content of fine particles to the locks, which ultimately leads to reduction in the loss of the mineral and decrease in the cost of rock breaking with a hydromonitor and the entire technology as a whole, as well as to improvement of useful component recovery.

### Key words:

deposit, hydraulic monitor, hydromonitor breaking, clay massif, fine soil particles, breaking performance, technological solutions, methodology, artificial intelligence, artificial neural networks.

*The study was funded by RFBR, project number 19-35-90112.*

### REFERENCES

1. Kislyakov V.E., Shkaruba N.A., Katyshev P.V. Investigation of the jet stream power of the hydromonitor about a sidewall. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*, 2018, no. 1, pp. 268–275. In Rus.
2. Shkaruba N.A. *Razrabotka tekhnologii otboyki porod gidromonitorom pri nalichii v ego strue chastits razlichnoy krupnosti*. Dis. Kand. nauk [Development of rock breaking technology with a hydromonitor in the presence of particles of various sizes in its jet. Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2020. 142 p.
3. Rojas R. *Neural networks: a system introduction*. Berlin, Springer, 1996. 509 p.
4. Haykin S. *Neural networks and learning machines*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, Prentice Hall/Pearson, 1999. 938 p.
5. Koul A., Ganju S., Kasam M. *Iskusstvenny intellekt i kompyuternoe zrenie. Realnye projekty na Python, Keras i TensorFlow* [Artificial intelligence and computer vision. Real projects in Python, Keras and TensorFlow]. St. Petersburg, Piter Publ., 2022. 608 p.
6. Smola A., Vishwanathan S.V.N. *Introduction to machine learning*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 234 p.
7. Koul A., Ganju S., Kasam M. *Practical deep learning for cloud, mobile, and edge: real-world AI & computer-vision projects using Python, Keras & TensorFlow*. USA, 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, 2020. 620 p.
8. Jung A. *Machine learning: the basics*. Singapore, Springer, 2022. 280 p.
9. Deitel P.J., Deitel H.M. *Python. Iskusstvenny intellekt, bolshie dannye i oblachnye vychisleniya* [Python. Artificial intelligence, big data and cloud computing]. St. Petersburg, Piter Publ., 2020. 860 p.

10. Kislyakov V.E. Limits the contamination of process water in the development of placer deposits gold. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*, 2017, no. 3, pp. 148–156. In Rus.
11. Shorokhov S.M., Zuykov A.A., Seleznev V.M. O kontrole mutnosti tekhnologicheskoy vody na dragakh i sposobe osvetleniya vody v drazhnom razreze pri besstochnoy skheme vodosnabzheniya [On the control of process water turbidity on dredges and the method of water clarification in a dredging section with a drainless water supply scheme]. *Kolyma*, 1973, no. 11, pp. 27–28.
12. Zamyatin O.V., Lopatin A.G., Sannikova N.P. *Obogashchenie zolotosoderzhashchikh peskov i konglomeratov* [Enrichment of gold-bearing sands and conglomerates]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 264 p.
13. Nazarov V.V., Chikin Yu.M., Lichaev V.R. *Vodosnabzhenie i oчитка stochnykh vod pri razrabotke rossypnykh mestorozhdeniy* [Water supply and wastewater treatment in the development of alluvial deposits] Moscow, Nedra Publ., 1975. 184 p.
14. Nazarov V.V., Konyukova A.T. Rabota dragi v «glukhom» zaboe [Work of a dredge in a «deaf» face]. *Kolyma*, 1969, no. 8, pp. 7–8.
15. Barabanov V.D. *Sovershenstvovanie tekhnologii izvlecheniya zolota i platiny iz rossypnykh mestorozhdeniy*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the technology of extracting gold and platinum from alluvial deposits. Cand. Diss. Abstract]. Sverdlovsk, 1971. 26 p.
16. Myazin V.P. *Izyskanie effektivnykh sposobov snizheniya mutnosti vody v drazhnom razreze pri razrabotke glinistykh rossypey*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Finding effective ways to reduce water turbidity in a dredging section in the development of clay placers. Cand. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 1975. 24 p.
17. Kislyakov V.E. *Raschet oistoynikov oborotnogo vodosnabzheniya pri razrabotke rossypey* [Calculation of settling tanks for circulating water supply in the development of placers]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk University Publ. House, 1988. 176 p.
18. Cielen D., Meysman Arno D.B., Mohamed A. *Introducing data science*. New York, USA, Publications Co., 2016. 322 p.
19. Watt J., Borhani R., Katsaggelos A.K. *Machine learning refined: foundations, algorithms, and applications*. New York, Cambridge University Press, 2020. 593 p.
20. Redko V.G. *Evolutsiya, neyronnye seti, intellekt: modeli i kontseptsii evolyutsionnoy kibernetiki* [Evolution, neural networks, intelligence: models and concepts of evolutionary cybernetics]. Moscow, Lenand Publ., 2019. 224 p.

Received: 26 November 2022.

Reviewed: 19 February 2023.

#### Information about the authors

*Natalya A. Shkaruba*, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.

*Zhasurbek I. Nabizhanov*, Cand Sc., research engineer, Siberian Federal University.

*Alexander I. Kosolapov*, Dr. Sc., professor, head of the Open pit mining Department, Siberian Federal University.

*Alexander K. Kirsanov*, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.

*Umarjon R. Teshaev*, Cand Sc., head of the Department of Engineering Geodesy, Mine Surveying and Cartography, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi.

УДК 556.561

## ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ПОСТПИРОГЕННЫХ БОЛОТ В УСЛОВИЯХ ЛЕСОТУНДРЫ И ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Харанжевская Юлия Александровна<sup>1</sup>,  
kharan@yandex.ru

Синюткина Анна Алексеевна<sup>1</sup>,  
ankalaeva@yandex.ru

<sup>1</sup> Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью оценки изменений химического состава природных вод под влиянием пирогенного фактора.

**Цель:** исследование химического состава вод постпирогенных участков болот в лесотундровой и таежной зонах Западной Сибири, анализ условий его формирования и закономерностей пространственной вариации в зависимости от степени выгорания поверхности.

**Объекты:** Васюганское болото, Усть-Бакcharское болото, плоскобугристое болото у с. Пангоды.

**Методы.** Лабораторное определение химического состава болотных вод проводилось методами титриметрии, спектрофотометрии, пламенной фотометрии в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиале Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН. Анализ содержания в пробах Cu, Pb, Cd, Zn, P, Mn производился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в Химико-аналитическом центре «Глазма». Статистическая обработка данных проводилась с применением непараметрического критерия Уилкоксона, кластерного анализа и метода главных компонент.

**Результаты.** Исследования показали, что индикатором влияния пирогенного фактора на химический состав болотных вод является повышение pH, минерализации и концентраций  $K^+$ ,  $SO_4^{2-}$ , а также  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $NO_3^-$ , P, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb. В процессе восстановления болота после пожара и минерализации верхних выгоревших слоев торфяной залежи в водах отмечается постепенное повышение концентраций  $NH_4^+$ ,  $Сор_2$  и ХПК. Анализ данных по химическому составу показал более в 4–16 раз – концентрации  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Сор_2$  и ХПК, P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb в водах плоскобугристого болота в лесотундре в сравнении с пробами и вод, отобранными на выгоревших участках в верховых болот таежной зоны Западной Сибири. Факторный анализ показал, что ведущим фактором формирования химического состава вод является степень выгорания поверхности, температура воды и уровни болотных вод. Таким образом, исследования показали, что химический состав вод постпирогенных болот во многом зависит от степени выгорания поверхности, исходных генетических особенностей болота и времени, прошедшего после пожара.

### Ключевые слова:

Болотные воды, химический состав, пирогенный фактор, влияние, Западная Сибирь.

### Введение

Природные пожары являются одной из глобальных экологических проблем. Современные климатические изменения увеличивают продолжительность и тяжесть пожароопасного периода, поэтому болота становятся более уязвимы для природных пожаров, увеличивается их частота и интенсивность, что является особенно актуальным для северных широт России в целом и для Сибири в частности [1–4].

Природные пожары оказывают существенное влияние на химический состав природных вод, а характер их постпирогенного изменения зависит от многих факторов, таких как гидрологический режим территории, топография, геология, размер пожара, интенсивность пожара [5, 6]. В результате горения торфа в атмосферный воздух выделяются  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ ,  $O_3$ , а также попадает целый ряд ионов ( $NO_3^- > SO_4^{2-} > Na^+ > Cl^- > Ca^{2+} > K^+ > F^- > Mg^{2+}$ ) и тяжелых металлов ( $Zn > Al > Fe > Cr > Pb > Cu > Ni > Cd$ ) в виде частиц размером менее 10 микрон [7].

Пожары на болотах приводят к изменению термического режима, на выгоревших участках происходит более быстрое стайвание снега [2], значимым последствием че-

го является увеличение водного стока. В результате пожара отмечается также снижение эвапотранспирации и образование особого гидрофобного слоя на поверхности. в результате чего увеличивается эрозия и сток минеральных веществ с водосбора [8]. Исследования показывают, что после пожара в водах отмечается увеличение концентрации главных катионов ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ) и анионов сильных кислот ( $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ), ионов аммония, общего азота и фосфора, тяжелых металлов, углеводородов [9–21]. Наибольшие изменения химического состава вод отмечаются в первые годы после пожара, однако негативная ситуация может сохраняться в течение трех и более лет после пожара [8, 13, 16, 21]. Исследования, проведенные на участке низинного болота в Бейбжанском национальном парке в Польше, показали, что в водах спустя 12 лет после пожара отмечается более высокий pH, повышенные концентрации  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ , а на некоторых участках также  $PO_4^{3-}$  и  $Fe^{3+}$  [21].

Таким образом, проблема пожаров на болотах и их экологических последствий является весьма актуальной. В настоящее время химический состав болотных вод Западной Сибири достаточно хорошо изучен [22–24], имеются данные о состоянии растительного

покрова выгоревших болот [25]. Однако следует отметить слабую изученность постпирогенной трансформации химического состава вод болот региона. Целью данной работы является исследование химического состава вод постпирогенных участков болот в лесотундровой и таежной зонах Западной Сибири, анализ условий формирования и закономерностей пространственной вариации в зависимости от степени выгорания поверхности.

#### Объекты и методика исследования

Исследования проводились в пределах трех ключевых участков болот (Васюганское болото, Усть-Бакчарское болото и плоскобугристое болото в районе с. Пангоды), расположенных в лесотундровой и таежной зоне Западной Сибири, выгоревших в 2014–2016 гг. (табл. 1, рис. 1). Отбор проб болотных вод производился на северо-восточном участке Васюганского болота на междуречье Бакчара и Иксы. Мощность торфяной залежи исследуемого участка в среднем составляет 2,5–3 м. Осушение участка Васюганского болота проведено с целью лесоразведения в 1980-х гг. сетью открытых каналов с расстоянием 160–180 м. Выгорание участка Васюганского болота произошло с августа по октябрь 2016 г., общая площадь пожара составила 5,54 км<sup>2</sup>. Наибольшее выгорание растительности и поверхности болота по данным полевых описаний в первые годы после пожара наблюдалось преимущественно вблизи осушительных каналов, где торфяная залежь выгорела на 5–15 см, на остальной территории наблюдалось частичное выгорание поверхности болота в слое до 5 см [26]. Полевые описания в 2022 г. показали, что произошла осадка поверхности болота, в результате чего горелый слой составляет всего 1–1,5 см. Торфяная залежь в слое 0–90 см представлена верховым балтикум-, магелланикум- и фускум-торфом, степень разложения в среднем составила 11 %, а в верхних слоях пирогенных участков отмечено увеличение до 13–15 %. Зольность торфа в слое 0–90 см в среднем составила 2 %, а на выгоревших участках было отмечено увеличение до 9–17 %.

Усть-Бакчарское болото расположено на левобережной террасе р. Бакчар и представляет собой небольшой болотный массив площадью 3,5 км<sup>2</sup>, в том числе осушенная часть составляет 1,6 км<sup>2</sup> [27]. Мощность торфяной залежи составила 3 м. Болото было осушено с целью добычи торфа, расстояние между осушительными каналами составляет 40 м. Пожар на Усть-Бакчарском болоте произошел в 2014 г. – выгорела территория площадью 0,5 км<sup>2</sup>. Мощность горелого слоя по данным полевых описаний 2016 г. составила около 10 см, а при отборе проб в 2022 г. мощность горелого слоя в результате его деградации составила около 1–1,5 см. Торфяная залежь в слое до 90 см представлена верховым балтикум- и фускум-торфом, степень разложения в среднем составляет 10–13 %, а на пирогенных участках в слое 0–5 см отмечается увеличение до 20 %. Зольность торфяной залежи до 90 см в среднем составила 2 % и увеличилась до 6–14 % в поверхностном слое на выгоревших участках.



Рис. 1. Схема расположения ключевых участков полевых исследований в 2022 г.

Fig. 1. Location map of field research sites in 2022

Таблица 1. Описание пунктов отбора проб болотных вод в 2022 г.

Table 1. Water sampling points in 2022

Участок Site	Дата отбора проб Water sampling date	Координаты Coordinates	Степень выгорания поверхности на площадке 5×5 м, % Degree of sur- face burnout on the site 5×5 m, %	Уровни болотных вод, см Water table level, cm
BF1	27.07.2022	56°52' 46,9", 82°41' 04,4"	93	–21
BF2	28.07.2022	56°53' 14,3", 82°40' 59,8"	67	–17
BF3	27.07.2022	56°52' 56,4", 82°40' 44,9"	71	–12
BF4	28.07.2022	56°53' 16,8", 82°40' 26,4"	97	–16
BF5	20.07.2022	56°53' 18,6", 82°40' 36,7"	74	–22
BF6	29.07.2022	56°51' 55,2", 82°41' 42,3"	0	–15
RGфон	20.07.2022	56°53' 25,8", 82°40' 50,5"	0	–15
UBF1	01.08.2022	57°34' 39,5", 82°16' 21,6"	99	–10
UBF2	01.08.2022	57°34' 35,5", 82°15' 59,6"	100	–14
UBFфон	31.07.2022	57°34' 41", 82°16' 25,9"	0	–30
PF1	13.08.2022	65°52' 20,7", 74°58' 09,2"	76	–19
PF2	15.08.2022	65°52' 11,0", 74°56' 27,9"	78	–10
Рфон	12.08.2022	65°52' 17,9", 74°57' 48,1"	0	–14

В лесотундровой зоне исследования проводились на плоскобугристом болоте площадью 15,8 км<sup>2</sup> в районе с. Пангоды на междуречье рек Пур и Надым, выгоревшем в 2016 г. Общая площадь выгорания на междуречье составила более 4 тыс. км<sup>2</sup>, площадь контура пожара в пределах болота составила 7 км<sup>2</sup>. Мощность торфяной залежи варьировала от 0 см в мочажинах до 1 м на буграх, толщина выгоревшего слоя по данным полевых описаний 2022 г. составила 10 см. Торфяная залежь в верхних слоях представлена в основном верховым фускум- и балтикум-торфом, который сменяется на древесно-травяной в нижних слоях. Степень разложения торфа варьирует в значительном диапазоне – от 5–7 % в слое 0–10 см и до 45 % в приграничном горизонте, а на пирогенном участке степень разложения в поверхностном слое увеличивается до 15 %. Зольность в верхних слоях торфяной залежи в среднем составляет 2–6 %, а на выгоревших участках повышается до 7–10 %. Также следует отметить значительное увеличение зольности до 30–45 % в нижних слоях торфяной залежи на буграх.

Отбор проб болотных вод производился в июле–августе 2022 г. из скважины в торфе, организованной непосредственно перед отбором проб. Отбор проб на Васюганском и Усть-Бакчарском болотах производился в пределах выгоревших и аналогичных им ненарушенных пирогенным фактором сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтах. Отбор проб на плоскобугристом болоте у с. Пангоды проводился в осоково-сфагновых мочажинах в связи с промерзанием бугров. В пределах каждого ключевого участка отбор проб производился на серии площадок 5×5 м с разной степенью выгорания поверхности, а фоновые участки выбирались за пределами контура пожара.

Определение химического состава болотных вод (табл. 2) проводилось в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиале Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН и в Химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск). Определение растворенного O<sub>2</sub> в болотных водах проводилось с использованием оксиметра Oxi 3205 фирмы WTW (Германия). Величину pH измеряли с помощью полевого прибора pH-200 фирмы HM Digital (Южная Корея), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) определяли ORP-200 фирмы HM Digital (Южная Корея). Электропроводность (ЕС) болотных вод измеряли с применением кондуктометра HI8733 фирмы HANNA Instruments (Германия).

Методика исследований включала кластерный анализ и оценку значимости различий в химическом составе вод постпирогенных и фоновых участков болот по непараметрическому критерию Уилкоксона при уровне значимости  $p=5\%$  в Statistica 10. Критерий основан на ранжировании величины изменения признака ( $n$ ), абсолютные значения ненулевых разностей ( $n$ ) упорядочиваются в порядке возрастания и определяются их ранги ( $R$ ). Критерий рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{|T - \frac{n(n+1)}{4}|}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}$$

где  $T$  – статистика критерия, равная наименьшему значению суммы рангов для отрицательных ( $R_n$ ) и положительных разностей ( $R_p$ ) [28].

**Таблица 2.** Описание методов определения химического состава болотных вод

**Table 2.** Analytical methods

Компонент Component	Метод/Method
Ca <sup>2+</sup>	Титриметрия/Titrimetry
Mg <sup>2+</sup>	
K <sup>+</sup>	Пламенная фотометрия Flame photometry (PFA-378, Russia)
Na <sup>+</sup>	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Спектрофотометрия Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
Cl <sup>-</sup>	Титриметрия/Titrimetry
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Спектрофотометрия Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
Fe <sub>total</sub>	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Титриметрия/Titrimetry
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Спектрофотометрия Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
C <sub>орг</sub> /DOC	Спектрофотометрия Spectrophotometry (PE-5400VI, Russia)
ХПК/COD	Титриметрия/Titrimetry
CO <sub>2</sub>	
P	Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS (ELANDRC-e, USA)
Mn	
Zn	
Cd	
Cu	
Pb	

Кластерный анализ проводили с использованием иерархического метода Уорда с расчетом евклидова расстояния. Анализ условий формирования химического состава вод постпирогенных болот осуществлялся методом главных компонент (Principal component analysis) с расчетом факторных нагрузок и построением графика каменной осыпи.

### Результаты и обсуждение

Исследования показали, что индикатором влияния пирогенного фактора на химический состав болотных вод является повышение pH, минерализации и концентраций K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, а также Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Fe<sub>общ</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, P, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb (рис. 2). В процессе восстановления болота после пожара и минерализации растительных остатков в верхних выгоревших слоях торфяной залежи в водах отмечается постепенное повышение концентраций NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, C<sub>орг</sub> и ХПК, что согласуется с проведенными ранее исследованиями [13, 29].

Отбор проб на северо-восточном участке Васюганского болота в июле 2017 г., через год после пожара, показал, что под влиянием пирогенного фактора в болотных водах наиболее выгоревшего участка отмечается снижение биогенных NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и органических веществ (C<sub>орг</sub> и ХПК) и повышение минеральных веществ K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sub>общ</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, а также накопление тяжелых металлов Zn, Cu, Pb, Cd [28].

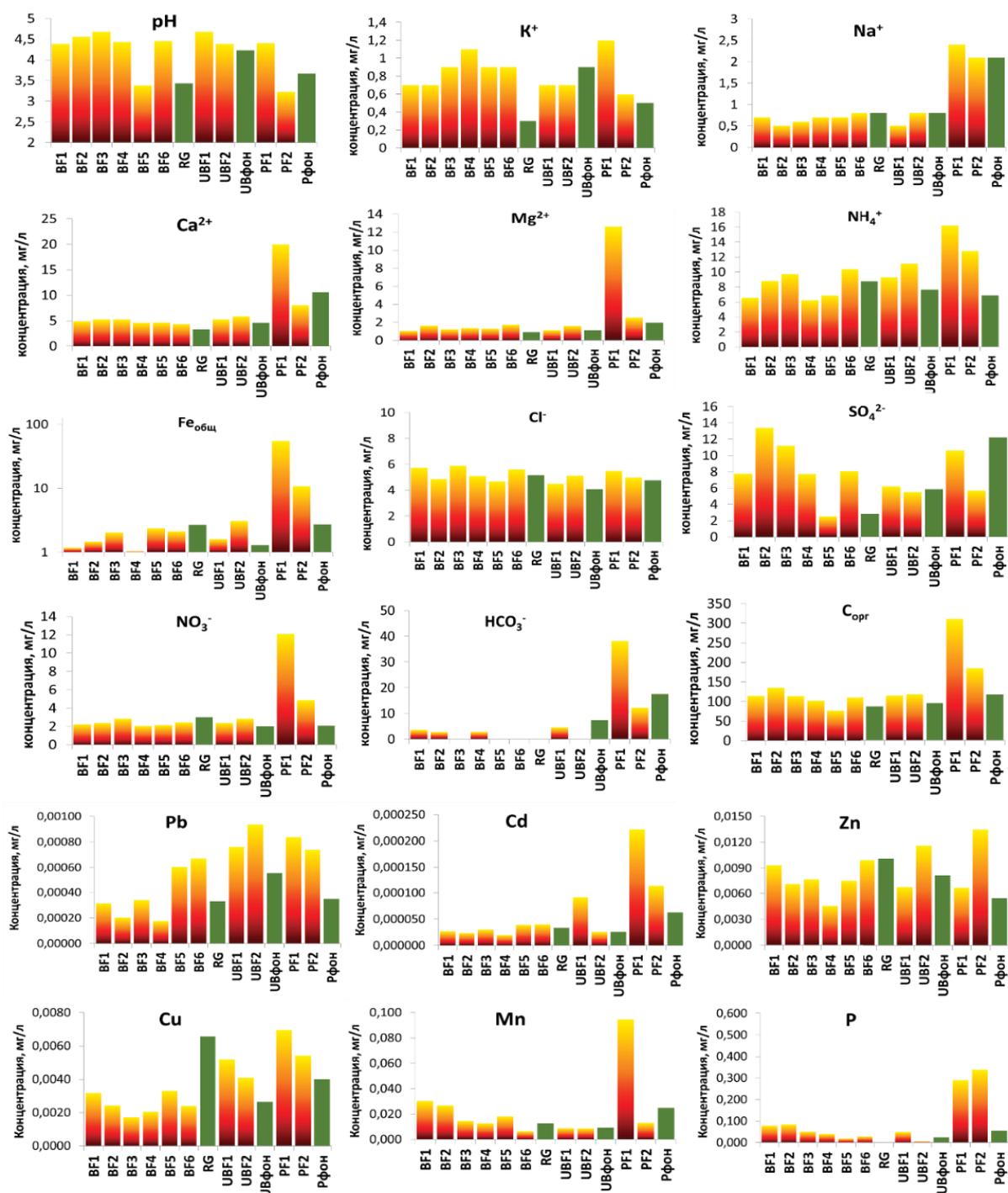


Рис. 2. Вариация химического состава вод постпирогенных участков Васюганского (BF, RG), Уст-Бакчарского (UB) и плоскобугристого болот у с. Пангоды (PF)

Fig. 2. Variation in water chemistry of post-fire areas within Great Vasyugan Mire (BF, RG), Ust-Bakchar bog (UB) and palsa mire near Pangody village (PF)

Повышение концентраций  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $Zn$ ,  $Cu$ ,  $Pb$ ,  $Cd$  в водах согласуется с ростом содержания этих компонентов в верхних слоях торфяной залежи участка Васюганского болота [30, 31]. Согласно данным [32] после пожара на поверхности образуется особый гидрофобный слой, который богат лабильными формами органического вещества, что приводит к росту  $C_{орг}$  в водах. Исследования на выгоревшем в 2010 г. участке болота Га-

лицкий мох показали существенное – в 3 раза – увеличение минерализации и pH вод (до 7,2), а также концентраций  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $P$ , снизилась цветность вод. В последующие годы отмечалось снижение концентраций, но в 2015 г. отмечено содержание  $SO_4^{2-}$  в 5 раз выше фона, фосфора – в 2 раза, ионов  $NO_3^-$  и  $NH_4^+$  – в 3 раза, а величина pH достигла фонового значения [13].

Анализ наших данных по химическому составу за 2022 г. показал более высокие – в 4–16 раз – концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$  и ХПК, P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb в водах постпирогенных участков плоскобугристого болота у с. Пангоды в лесотундровой зоне в сравнении с пробами, отобранными на участках верховых болот таежной зоны Западной Сибири, что, вероятно, определяется генетическими особенностями и малой мощностью торфяной залежи болотного массива в зоне распространения многолетнемерзлых пород, а также степенью выгорания поверхности. В пробах болотных вод, отобранных в таежной зоне в пределах постпирогенных участков Васюганского и Усть-Бакчарского болота, можно отметить сопоставимые средние концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , СГ,  $\text{C}_{\text{орг}}$  и минерализации вод. При этом в водах Васюганского болота отмечено более высокое содержание  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , P, Mn и величины ХПК вод, и наоборот в водах Усть-Бакчарского болота наблюдаются повышенные концентрации  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Cu, Zn, Cd, Pb.

Кластерный анализ, проведенный на основе всех отобранных проб болотных вод, показал существенные различия в химическом составе исследуемых объектов, разделив их на четыре кластера. В первый и во второй кластер выделились пробы PF1 и PF2, отобранные на выгоревшем участке плоскобугристого болота и характеризующиеся резкими различиями в химическом составе вод. В третий кластер выделились все пробы, отобранные в пределах Усть-Бакчарского болота, а также три пробы с Васюганского болота (BF3, BF4, BF6) и фоновая проба с плоскобугристого болота (PFфон), что свидетельствует о сопоставимых характеристиках состава вод. При этом проба BF6 была отобрана на участке, выгоревшем, по данным анализа космоснимков, в 1990-е гг. с практически полным отсутствием следов пожара. Следует отметить, что в отдельный подкластер выделились проба BF4 с наиболее выгоревшего участка Васюганского болота и фоновая проба PFфон с естественной части плоскобугристого болота у с. Пангоды. В четвертый кластер выделились четыре пробы с Васюганского болота.

Анализируя данные по Васюганскому болоту, можно отметить статистически значимые отличия по непараметрическому критерию Уилкоксона ( $Z=2,24$ ,  $p<0,025$ ) в сравнении с фоном в химическом составе вод участка BF4, который вошел в первый кластер и характеризуется наибольшей степенью выгорания поверхности (около 97 %). В водах отмечается повышенные величины pH вод и в 1,5–4 раза относительно фона (RG) концентраций  $\text{K}^+$  до 1,1 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 4,53 мг/л,  $\text{Mg}^{2+}$  – 1,36 мг/л,  $\text{SO}_4^{2-}$  – 7,72 мг/л,  $\text{HCO}_3^-$  – 2,90 мг/л, и в 23 раза содержания P – 0,039 мг/л. Пробы, отобранные на постпирогенных BF3, BF5, BF6 и фоновом RG участках, сформировали второй кластер. Для второго кластера характерно сочетание двух условий – с одной стороны, средняя степень выгорания поверхности способствует восстановлению болота после пожара, в результате в водах постпирогенных участков отмечается отсутствие  $\text{HCO}_3^-$  при низких pH и наоборот рост средних концентраций  $\text{NH}_4^+$  –

9,0 мг/л,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  – 2,18 мг/л,  $\text{NO}_3^-$  – 2,47 мг/л, ХПК – 197 мгО/л, а с другой стороны, сохраняется остаточное влияние пирогенного фактора на химический состав и в водах наблюдаются повышенные в 1,5–3 раза относительно фона концентрации  $\text{K}^+$  – 0,9 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 4,72 мг/л,  $\text{Mg}^{2+}$  – 1,42 мг/л,  $\text{SO}_4^{2-}$  – 7,27 мг/л, Pb – 0,00054 мг/л и в 19 раз выше фоновых отмечено содержание P – 0,032 мг/л. В третий кластер выделились пробы BF1 и BF2, в водах которых отмечается наиболее высокое содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  (13,4 мг/л),  $\text{HCO}_3^-$  (3,51 мг/л),  $\text{C}_{\text{орг}}$  (124 мг/л), P (0,081 мг/л), Mn (0,029 мг/л), повышенные величины pH, ХПК и минерализации вод.

Анализируя данные по Усть-Бакчарскому болоту, можно отметить, что пирогенные участки относительно фона характеризуются повышенным в 1,2–2,3 раза содержанием  $\text{Ca}^{2+}$  (5,49 мг/л),  $\text{Mg}^{2+}$  (1,36 мг/л),  $\text{NH}_4^+$  (10,2 мг/л),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (2,35 мг/л),  $\text{NO}_3^-$  (2,61 мг/л),  $\text{C}_{\text{орг}}$  (115 мг/л), Cu (0,0046 мг/л), Cd (0,00006 мг/л), Pb (0,00085 мг/л). Кластерный анализ показал наличие двух кластеров. В первый кластер выделилась проба с фонового участка Усть-Бакчарского болота, а во второй кластер объединились пробы, отобранные с пирогенных участков. Статистический анализ с применением непараметрического критерия Уилкоксона не показал достоверных различий в химическом составе, что, вероятно, связано с тем, что в результате полевых исследований были отмечены следы более старого пожара (около 20 лет назад) на фоновом участке (УВфон). При этом повышение концентраций биогенных и органических веществ в болотных водах в большей степени свидетельствует о процессах деградации торфяной залежи в условиях низких уровней болотных вод, чем о влиянии пирогенного фактора, что согласуется со снижением пористости верхних слоев торфяной залежи, отмеченным при отборе проб (рис. 3).

Анализ данных по плоскобугристому болоту у с. Пангоды показал достоверные различия в химическом составе проб, отобранных на постпирогенных участках PF1 ( $Z=2,68$ ,  $p<0,007$ ) и PF2 ( $Z=2,01$ ,  $p<0,044$ ) по непараметрическому критерию Уилкоксона в сравнении с фоном PFфон. Однако кластерный анализ показал, что проба PF2 более близка по химическому составу к фоновой PFфон и объединил их в 1 кластер. В целом под влиянием пирогенного фактора отмечено существенное (в 2–11 раз) повышение относительно фона содержания в водах  $\text{K}^+$  (0,9 мг/л),  $\text{Ca}^{2+}$  (14,0 мг/л),  $\text{Mg}^{2+}$  (7,58 мг/л),  $\text{NH}_4^+$  (14,5 мг/л),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (32,8 мг/л),  $\text{NO}_3^-$  (4,12 мг/л), ХПК (476 мгО/л),  $\text{C}_{\text{орг}}$  (247 мг/л), P (0,315 мг/л), Mn (0,054 мг/л), Cu (0,0062 мг/л), Zn (0,010 мг/л), Cd (0,00017 мг/л), Pb (0,00079 мг/л). Следует отметить, что химический состав вод исследуемого постпирогенного участка плоскобугристого болота имеет существенные отличия в сравнении с опубликованными данными и более близкий состав имеет фоновый участок (PFфон) [33]. Так, в сравнении с опубликованными данными по плоскобугристым болотам в районе с. Пангоды в отобранных нами на постпирогенном участке пробах вод отмечены более высокие концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$  и сопоставимое содержание  $\text{K}^+$ , P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb.

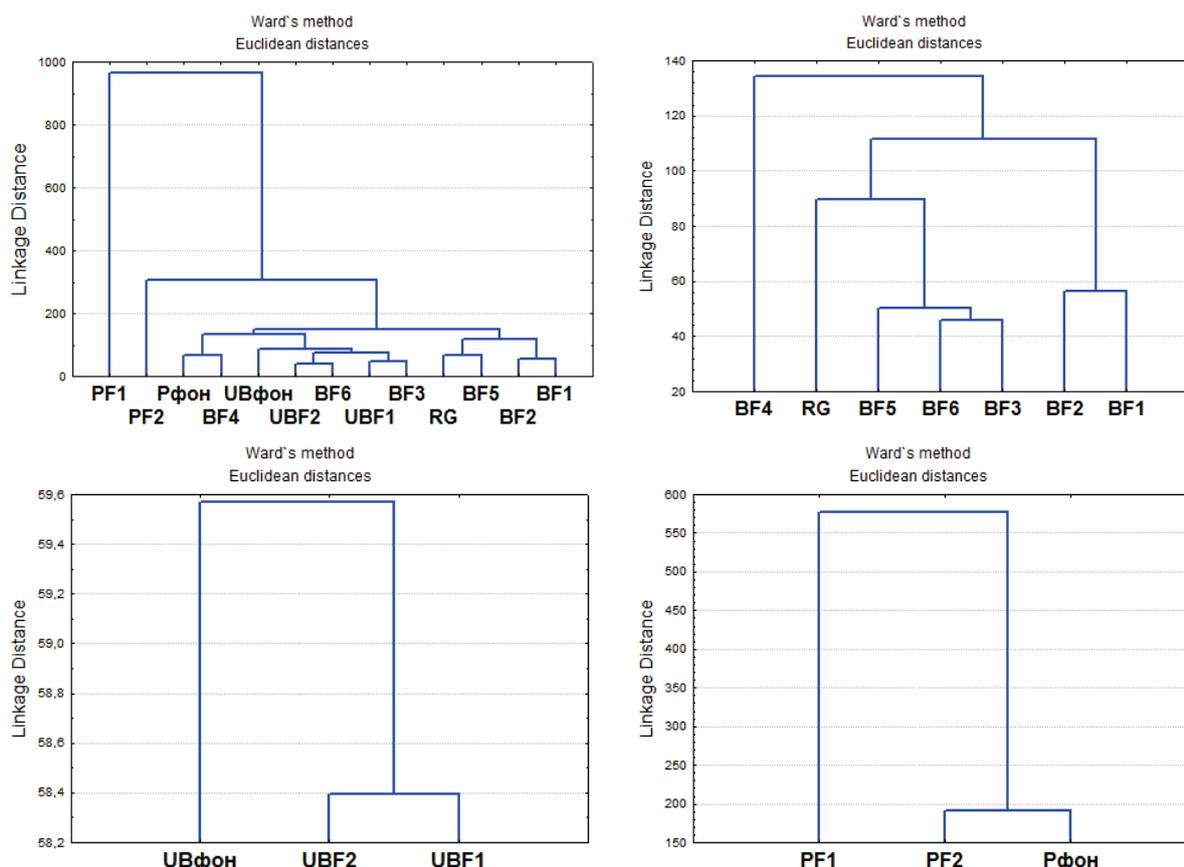


Рис. 3. Дендрогаммы химического состава вод участков Васюганского (BF1-6, RG), Усть-Бакчарского (UBF1-2, UBF фон) и плоскобугристого болот у с. Пангоды (PF1-2, Рфон)

Fig. 3. Dendrogram of the water chemical composition of the Great Vasyugan Mire (BF1-6, RG), Ust-Bakchar bog (UBF1-2, UBF фон) and palsa mire near Pangody village (PF1-2, Рфон)

Анализ условий формирования химического состава болотных вод с применением метода главных компонент показал, что в пределах Васюганского болота степень выгорания поверхности (–0,78) и температура воды (–0,51) определяет повышение pH вод (–0,77) и содержания  $\text{Ca}^{2+}$  (–0,84),  $\text{SO}_4^{2-}$  (–0,78), P (–0,87),  $\text{HCO}_3^-$  (–0,77),  $\text{C}_{\text{орг}}$  (–0,73),  $\text{CO}_2$  (–0,71),  $\text{K}^+$  (–0,54), Mn (–0,52), при этом в обратной корреляции находятся  $\text{Na}^+$  (0,75),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (0,89),  $\text{NO}_3^-$  (0,54), Cu (0,77), Zn (0,65), Cd (0,78), Pb (0,59). Вторая компонента менее значима и характеризует процессы увеличения концентрации компонентов и их выноса при повышении уровней болотных вод (0,76). Высокие факторные нагрузки имеют  $\text{NH}_4^+$  (0,92),  $\text{NO}_3^-$  (0,64 мг/л),  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,62),  $\text{C}_{\text{орг}}$  (0,61), Zn (0,38) и минерализация (0,72). В целом влияние температурного фактора на химический состав вод постпирогенных участков имеет интересную тенденцию. Исследования показывают, что выгоревшие участки Васюганского болота характеризуются более высокой температурой торфяной залежи и вод, при этом снижение температуры воды, величины pH и повышение содержания  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$  в водах на выгоревших участках коррелирует с восстановлением растительного покрова, которое стартовало согласно предыдущим исследованиям [26] на второй–третий год после пожара.

В пределах Усть-Бакчарского болота факторный анализ показал, что первая компонента наиболее значима (65 %), а ведущим фактором формирования химического состава является степень выгорания поверхности (–0,91) и уровень болотных вод (–0,84). Высокие факторные нагрузки имеют ЕС (–0,78),  $\text{Ca}^{2+}$  (–0,99),  $\text{Mg}^{2+}$  (–0,82),  $\text{NH}_4^+$  (–0,99),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (–0,91), Cl (–0,98),  $\text{NO}_3^-$  (–0,98), ХПК (–0,90),  $\text{C}_{\text{орг}}$  (–0,94), минерализация (–0,99), Cu (–0,63), Zn (–0,63), Pb (–0,99), что отражает процессы биodeградации торфяной залежи. В обратной корреляции находится температура воды (0,95), которая тесно связана с содержанием  $\text{K}^+$  (0,90),  $\text{HCO}_3^-$  (0,98), Mn (0,93),  $\text{O}_2$  (0,90). Вторая компонента в основном отражает влияние смены окислительно-восстановительных условий (Eh, –0,81) при колебании уровней болотных вод (–0,55) на pH вод (–0,91) и содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  (–0,89),  $\text{CO}_2$  (–0,88), P (–0,94), Cu (–0,78), Cd (–0,99), а также Zn (0,78),  $\text{Na}^+$  (0,99), что характеризует закономерности их водной и биогенной миграции.

В пределах плоскобугристого болота у с. Пангоды первая компонента является наиболее значимой (75 %), ведущими факторами формирования химического состава являются степень выгорания поверхности (0,70) и температура воды (0,53), которые находятся в прямой корреляции с pH (0,84), минерализацией (0,98) и содержанием большинства компонентов

в составе вод  $K^+$  (0,99),  $Na^+$  (0,98),  $Ca^{2+}$  (0,92),  $Mg^{2+}$  (0,99),  $NH_4^+$  (0,88),  $Fe_{общ}$  (0,99),  $Cl^-$  (0,99),  $NO_3^-$  (0,99),  $HCO_3^-$  (0,93), ХПК (0,98),  $CO_2$  (0,99),  $C_{орг}$  (0,99),  $Mn$

(0,95),  $Cu$  (0,95),  $Cd$  (0,99),  $Pb$  (0,79), при этом в обратной корреляции находятся уровни болотных вод (-0,80), что характеризует эффект разбавления (рис. 4).

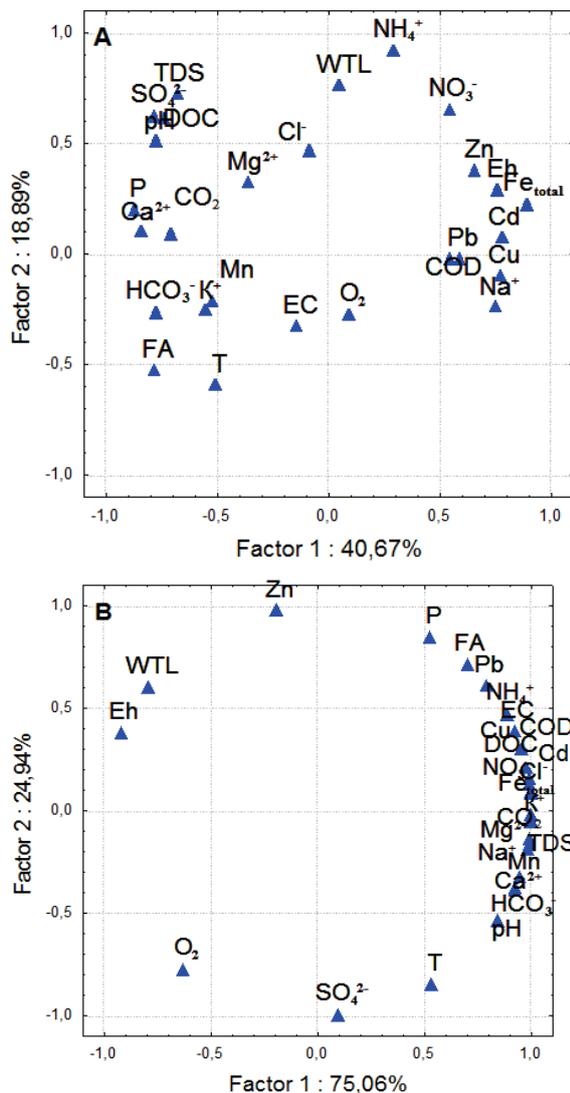


Рис. 4. Диаграммы факторного анализа химического состава вод участков Васюганского (А), Усть-Бакчарского (Б) и плоскобугристого болот (В) у с. Пангоды (TDS-минерализация, мг/л; DOC (dissolved organic carbon) – растворенный углерод, мг/л; COD – химическое потребление кислорода, мг/л; WTL – уровень болотных вод в дату отбора проб, см; T – температура воды в дату отбора проб, °C; EC – электропроводность, мкс/см; Eh – окислительно-восстановительный потенциал, мВ; FA – степень выгорания поверхности, %)

Fig. 4. Diagrams of factor analysis of water chemistry at Great Vasyugan mire (A), Ust-Bakchar bog (B), pal-sa mire near Pangody village (B) (TDS – total dissolved solids, mg/l; DOC – dissolved organic carbon, mg/l; COD – chemical oxygen demand, mg/l; WTL – water table level, cm; T – water temperature on the sampling date, °C; EC – electrical conductivity,  $\mu S/cm$ ; Eh – redox potential, mV; FA – degree of surface burnout, %)

### Заключение

Исследования показали, что индикатором влияния пирогенного фактора на химический состав болотных вод является повышение pH, минерализации и концентраций  $K^+$ ,  $SO_4^{2-}$ , а также  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $NO_3^-$ , P, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb. В процессе восстановления болота после пожара и минерализации растительных остатков в верхних выгоревших слоях торфяной залежи в водах отмечается постепенное повышение концентраций  $NH_4^+$ ,  $C_{орг}$  и ХПК. Кластерный анализ, проведенный на основе всех отобранных проб болотных вод, показал существенные различия в химическом составе исследуемых объектов; по результатам анализа сформировано четыре кластера. Анализ данных по химическому составу исследуемых болот показал более высокие – в 4–16 раз – концентрации  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $C_{орг}$  и

ХПК, P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb в водах постпирогенных участков плоскобугристого болота в лесотундровой зоне в сравнении с пробами, отобранными на выгоревших участках верховых болот таежной зоны Западной Сибири. В пробах болотных вод, отобранных в таежной зоне в пределах постпирогенных участков Васюганского и Усть-Бакчарского болота, можно отметить сопоставимые средние концентрации  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $C_{орг}$  и минерализации вод. Факторный анализ показал, что в таежной зоне Западной Сибири в пределах Васюганского и Усть-Бакчарского болота ведущим фактором формирования химического состава вод является степень выгорания поверхности, температура воды, уровни болотных вод, которые определяют повышение концентраций  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $C_{орг}$ , Mn, P, а также  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $C_{орг}$ ,  $Cl^-$ , Zn, Cu, Pb, что характери-

зует процессы биодegradации и миграции веществ в торфяной залежи. В лесотундровой зоне ведущими факторами формирования химического состава вод является также степень выгорания поверхности и термический режим, однако факторный анализ показал, что повышение уровней болотных вод при оттаивании сезонной и многолетней мерзлоты и/или выпадении атмосферных осадков способствует снижению

концентрации исследуемых компонентов за счет эффекта разбавления.

Таким образом, химический состав вод постпирогенных болот во многом зависит от степени выгорания поверхности, исходных генетических особенностей болота и времени, прошедшего после пожара.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wildfires in the Siberian taiga / V.I. Kharuk, E.I. Ponomarev, G.A. Ivanova, M.L. Dvinskaya, S.C. Coogan, M.D. Flannigan // *Ambio*. – 2021. – V. 50. – P. 1953–1974. URL: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>, 2021 (дата обращения 15.01.2023).
2. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost / C. Ackley, S.E. Tank, K.M. Haynes, F. Rezanezhad, C. McCarter, W.L. Quinton // *Science of the Total Environment*. – 2021, 15 August. – V. 782. – 146841 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841
3. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia / A. Feurdean, G. Florescu, I. Tantau, B. Vanniere, A.-C. Diaconu, M. Pfeiffer, D. Warren, S.M. Hutchinson, N. Gorina, M. Galka, S. Kirpotin // *Quaternary Science Reviews*. – 2020. – № 244. – 106495. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495
4. Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands / K. Nelson, D. Thompson, C. Hopkinson, R. Petrone, L. Chasmer // *Science of The Total Environment*. – 2021. – V. 769. – 145212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212
5. Carignan R., D'Arcy P., Lamontagne S. Comparative impacts of fire and forest harvesting on water quality in Boreal Shield lakes // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 2000. – V. 57. – P. 105–117. URL: <https://doi.org/10.1139/f00-125> (дата обращения 15.01.2023).
6. Ranalli A.J. A summary of the scientific literature on the effects of fire on the concentration of nutrients in surface waters. US Geological Survey Open-File Report 2004-1296. – P. 23. URL: <https://doi.org/10.3133/ofr20041296> (дата обращения 15.01.2023).
7. Othman M., Latif M.T. Dust and gas emissions from small-scale peat combustion // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2013. – V. 13 (3). – P. 1045–1059. DOI: 10.4209/aaqr.2012.08.0214
8. Post-fire water-quality response in the western United States / A.J. Rust, T.S. Hogue, S. Saxe, J. McCray // *International Journal of Wildland Fire*. – 2018. – V. 27 (3). – 203. DOI: 10.1071/wf17115
9. The effects of wildfire on the water chemistry of dilute, acidic lakes in southern Norway / E. Lydersen, R. Høgberget, C.E. Moreno et al. // *Biogeochemistry*. – 2014. – V. 119. – P. 109–124. URL: <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9951-8> (дата обращения 15.01.2023).
10. Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales / C.A. Emmerton, C.A. Cooke, S. Hustindss, U. Silins, M.B. Emelko, T. Lewis, J.F. Orwin // *Water Research*. – 2020. – 116071. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116071
11. Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Михайлова А.В. Изменение химического состава болотных вод после пожаров 2010 года (на примере водосбора Ивановского водохранилища) // *Тр. Института*. – 2011. – № 4 (57). – С. 12–16.
12. Естественное восстановление болот после пожаров / Н.П. Ахметьева, С.Э. Белова, Р.Г. Джамалов, И.С. Куличевская, Е.Е. Лапина, А.В. Михайлова // *Водные ресурсы*. – 2014. – Т. 41. – № 4. – С. 343–354.
13. Торфяные болота центральных областей Европейской части России: их трансформация за последние 100 лет / Н.П. Ахметьева, А.В. Михайлова, Г.Н. Кричевец, А.Ю. Беляев. – М.: ГЕОС, 2020. – 134 с.
14. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Влияние катастрофических лесных пожаров на химический состав в бассейне р. Анюй (Северный Сихотэ-Алинь) // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. – 2016. – № 3. – С. 47–54.
15. Опыт оценки воздействия лесоторфяных пожаров на гидрохимические свойства эвтрофных болот / Т.Т. Ефремова, А.В. Пименов, С.П. Ефремов, А.Ф. Аврова, Д.Ю. Ефимов // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. – 2021. – № 5. – С. 537–546.
16. Украинцев А.В. Особенности миграции химических элементов в снежном покрове и поверхностных водах в районах лесных пожаров Центральной Бурятии: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – Улан-Удэ, 2017. – 141 с.
17. Wildfire impacts on surface water quality parameters: cause of data variability and reporting needs / O.D. Raoelison, R. Valenca, A. Lee, S. Karim, J.P. Webster, B.A. Poulin, S.K. Mohanty // *Environmental Pollution*. – 2023, Jan 15. – V. 317. – 120713. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120713.
18. Assessing leached TOC, nutrients and phenols from peatland soils after lab-simulated wildfires: Implications to source water protection / Y. Wu, X. Xu, C.P.R. McCarter, N. Zhang, M.A. Ganzoury, J.M. Waddington, C-F. de Lannoy // *Science of The Total Environment*. – 20 May 2022. – V. 822. – 153579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153579> (дата обращения 15.01.2023).
19. Wildfire-driven changes in hydrology mobilize arsenic and metals from legacy mine waste / S.F. Murphy, R.B. McCleskey, D.A. Martin, J.M. Holloway, J.H. Writer // *Science of The Total Environment*. – 2020. – 140635. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140635
20. Post-fire composition of lipids in waters and plants of Great Vasyugan Mire / I.V. Russkikh, E.B. Strelnikova, O.V. Serebrennikova, Yu.A. Kharanzhevskaya // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 928. – 2021. – 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012010
21. Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen / M. Sulwiński, M. Mętrak, M. Wilk, M. Suska-Malawska // *Science of The Total Environment*. – 2020. – V. 746. – 141142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142
22. Савичев О.Г., Мазуров А.К. Временные изменения химического состава вод в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 38–48.
23. Сравнительный анализ подземных и болотных вод в юго-восточной части Западной Сибири / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Хэн Ян, Е.В. Перегудина // *Разведка и охрана вод*. – 2022. – № 5. – С. 26–33. DOI: 10.53085/0034-026X\_2022\_05\_26
24. Фоновые показатели эколого-геохимического состояния вод верховых болот в таежной зоне на территории Российской Федерации / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, М.А. Рудмин, А.А. Хвашевская, А.Б. Даулетова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 101–116.
25. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья рек Икса-Шегарка) / В.А. Базанов, Б.А. Егоров, В.А. Лыготин, А.А. Скугарев // *Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития* / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 190–196.
26. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation / A.A. Sinyutkina, L.P. Gashkova, N.G. Koronotova, A.A. Maloletko, N.P. Mironycheva-Tokareva, I.V. Russkikh, O.V. Serebrennikova,

- Е.В. Strelnikova, E.K. Vishnyakova, Yu. A. Kharanzhevskaya // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020. – V. 408. – 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012037
27. Sinyutkina A.A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: peat accumulation and vegetation dynamics // *Catena*. – 2021. – № 205. – 105464. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464> (дата обращения 15.01.2023).
28. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. – М.: Форум, 2011. – 464 с.
29. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – V. 928. – 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006
30. Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Интегральная оценка пирогенной нагрузки по содержанию Cu, Pb, Zn и Cd в компонентах Васюганского болота (Западная Сибирь) // *Геосферные исследования*. – 2019. – № 4. – С. 62–73.
31. Гашкова Л.П. Оценка влияния выгорания растительности на распределение элементов в торфяной залежи верхового болота // *Геосферные исследования*. – 2022. – № 1. – С. 118–125. DOI: 10.17223/25421379/22/9
32. Post fire litters are richer in water soluble carbon and lead to increased microbial activity / E. Stirling, L.M. Macdonald, R.J. Smernik, T.R. Cavagnaro // *Applied Soil Ecology*. – 2019. – V. 136. – P. 101–105. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.12.021
33. Раудина Т.В. Состав и свойства жидкой фазы торфяных почв криоли토ны Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Томск, 2018. – 24 с.

Поступила: 19.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 14.02.2023 г.

### Информация об авторах

**Харанжевская Ю.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научно-го центра агробиотехнологий РАН.

**Синюткина А.А.**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН.

UDC 556.561

## WILDFIRE-RELATED CHANGES OF MIRE WATER CHEMISTRY IN FOREST-TUNDRA AND TAIGA ZONES OF WESTERN SIBERIA

Yulia A. Kharanzhevskaya<sup>1</sup>,  
kharan@yandex.ru

Anna A. Sinyutkina<sup>1</sup>,  
ankalaeva@yandex.ru

<sup>1</sup> Siberian Research Institute of Agriculture and Peat branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, 3, Gagarin street, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to assess changes in waters chemical composition of mires under the influence of the pyrogenic factor.

**The aim:** to study mire water chemistry of post-fire areas in the forest-tundra and taiga zones of Western Siberia, to analyze the conditions for its formation and patterns of spatial variation depending on the degree of surface burnout.

**Objects:** Great Vasyugan Mire, Ust-Bakchar bog, palsa mire near Pangody village.

**Methods.** Laboratory analysis of the water chemical composition was carried out by titrimetry, spectrophotometry, and flame photometry at the Laboratory and Analytical Center of the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat. Analysis of Cu, Pb, Cd, Zn, P, Mn content in water samples was carried out by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the Plasma Chemical Analytical Center. Statistical data processing was carried out using the nonparametric Wilcoxon test, cluster analysis, and principal component analysis.

**Results.** Studies have shown that an indicator of the influence of the pyrogenic factor on the water chemistry is an increase in pH, total dissolved solids and concentrations of  $K^+$ ,  $SO_4^{2-}$ , as well as  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $Fe_{total}$ , P, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb. During the self-restoration of mires after the fire, a gradual increase in the concentrations of  $NH_4^+$ , DOC and COD is noted in the waters. Analysis of the data showed 4–16 times higher concentrations of  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Fe_{total}$ ,  $HCO_3^-$ , DOC and COD, P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb in the waters of palsa mire in the forest-tundra zone in comparison with water samples taken in the burnt areas in the taiga zone of Western Siberia. Factor analysis showed that the leading factor in the formation of water chemistry is the degree of surface burnout, water temperature, and water table levels. Thus, studies have shown that the water chemistry of post-fire mires largely depends on the degree of surface burnout, the initial genetic characteristics of the mire, and the time elapsed after the fire.

### Key words:

Waters, chemical composition, pyrogenic factor, influence, Western Siberia.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-77-10024.

### REFERENCES

- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 2021, 50, pp. 1953–1974. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>, 2021 (accessed 15 January 2023).
- Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezaeehad F., McCarter C., Quinton W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost. *Science of the Total Environment*, 2021, 15 August, vol. 782, 146841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Galka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia. *Quaternary Science Reviews*, 2020, no. 244, 106495. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495
- Nelson K., Thompson D., Hopkinson C., Petrone R., Chasmer L. Peatland-fire interactions: a review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 769, 145212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212
- Carignan R., D'Arcy P., Lamontagne S. Comparative impacts of fire and forest harvesting on water quality in Boreal Shield lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, vol. 57, pp. 105–117. Available at: <https://doi.org/10.1139/f00-125> (accessed 15 January 2023).
- Ranalli A.J. A summary of the scientific literature on the effects of fire on the concentration of nutrients in surface waters. *US Geological Survey Open-File Report 2004-1296*. 23 p. Available at: <https://doi.org/10.3133/ofr20041296> (accessed 15 January 2023).
- Othman M., Latif M.T. Dust and gas emissions from small-scale peat combustion. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, vol. 13 (3), pp. 1045–1059. DOI: 10.4209/aaqr.2012.08.0214
- Rust A.J., Hogue T.S., Saxe S., McCray J. Post-fire water-quality response in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 2018, vol. 27 (3), 203. DOI: 10.1071/wfl7115
- Lydersen E., Høgberget R., Moreno C.E. The effects of wild fire on the water chemistry of dilute, acidic lakes in southern Norway. *Biogeochemistry*, 2014, vol. 119, pp. 109–124. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9951-8> (accessed 15 January 2023).
- Emmerton C.A., Cooke C.A., Hustindss S., Silins U., Emelko M.B., Lewis T., Orwin J.F. Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales. *Water Research*, 2020, 116071. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116071
- Akhmeteva N.P., Lapina E.E., Mikhailova A.V. Changes in the chemical composition of mire waters after the fires of 2010 (on the example of the watershed of the Ivankovo reservoir). *Proceedings of Instorf*, 2011, no. 4 (57), pp. 12–16. In Rus.
- Akhmeteva N.P., Belova S.E., Dzhamalov R.G., Kulichevskaya I.S., Lapina E.E., Mikhailova A.V. Self-restoration of mires after fires. *Water resources*, 2014, vol. 41, no. 4, pp. 343–354. In Rus.
- Akhmetyeva N.P., Mikhaylova A.V., Krichevets G.N., Belyayev A.Yu. *Torfyanye bolota tsentralnogo okhvata chastey Rossii: ikh transformatsiya za posledniye 100 let* [Peat bogs in the central regions of the European part of Russia: their transformation over the past 100 years]. Moscow, GEOS Publ., 2020. 134 p.
- Shesterkin V.P., Shesterkina N.M. Influence of catastrophic forest fires on the chemical composition in the basin of the Anyui River (Northern Sikhote-Alin). *Bulletin of the North-Eastern Scientific*

- Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2016, no. 3, pp. 47–54.
15. Efremova T.T., Pimenov A.V., Efremov S.P., Avrova A.F., Efimov D.Yu. Experience in assessing the impact of forest-peat fires on the hydrochemical properties of eutrophic bogs. *Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Biological series*, 2021, no. 5, pp. 537–546. In Rus.
  16. Ukrainets A.V. *Osobennosti migratsii khimicheskikh elementov v snezhnom pokrove i poverkhnostnykh vodakh v rayonakh lesnykh pozharishch Tsentralnoy Buryatii*. Dis. Kand. nauk [Features of the migration of chemical elements in the snow cover and surface waters in the areas of forest fires in Central Buryatia, Cand. Diss.]. Ulan-Ude, 2017. 141 p.
  17. Raelison O.D., Valenca R., Lee A., Karim S., Webster J.P., Poulin B.A., Mohanty S.K. Wildfire impacts on surface water quality parameters: Cause of data variability and reporting needs. *Environmental Pollution*, 2023, Jan 15, vol. 317, 120713. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120713.
  18. Wu Y., Xu X., McCarter C.P.R., Zhang N., Ganzoury M.A., Waddington J.M., De Lannoy C-F. Assessing leached TOC, nutrients and phenols from peatland soils after lab-simulated wildfires: Implications to source water protection. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 822, 153579. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153579> (accessed 15 January 2023).
  19. Murphy S.F., McCleskey R.B., Martin D.A., Holloway J.M., Writer J.H. Wildfire-driven changes in hydrology mobilize arsenic and metals from legacy mine waste. *Science of The Total Environment*, 2020, 140635. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140635
  20. Russkikh I.V., Strelnikova E.B., Serebrennikova O.V., Kharanzhevskaya Yu. A. Post-fire composition of lipids in waters and plants of Great Vasyugan Mire. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 928, 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012010
  21. Sulwiński M., Mętrak M., Wilk M., Suska-Malawska M. Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: Long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 746, 141142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142
  22. Savichev O.G., Mazurov A.K. Temporal changes in the chemical composition of waters in the eastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 38–48. In Rus.
  23. Savichev O.G., Domarenko V.A., Yang Heng, Peregudina E.V. Comparative analysis of underground and swamp waters in the southeastern part of Western Siberia. *Exploration and protection of waters*, 2022, no. 5, pp. 26–33. In Rus. DOI: 10.53085/0034-026X\_2022\_05\_26
  24. Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Khvashchevskaya A.A., Daultova A.B. Background indicators of the ecological and geochemical state of the waters of raised bogs in the taiga zone on the territory of the Russian Federation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 101–116. In Rus.
  25. Bazanov V.A., Egorov B.A., Lgotin V.A., Skugarev A.A. Sovremennaya prostranstvennaya dinamika Bolshogo Vasyuganskogo bolota (na primere mezhdurechya rek Iksa–Shegarka) [Modern spatial dynamics of the Great Vasyugan Mire (on the example of the interfluvium of the Iksa–Shegarka rivers)]. *Bolshoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan Mire. Current state and development processes]. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ. house, 2002. pp. 190–196.
  26. Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronotova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strelnikova E.B., Vishnyakova E.K. Kharanzhevskaya Yu. A. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 408, 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012037
  27. Sinyutkina A.A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: peat accumulation and vegetation dynamics. *Catena*, 2021, no. 205, 105464. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464> (accessed 15 January 2023).
  28. Vukolov E.A. *Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsiy s ispolzovaniem paketov STATISTICA i EXCEL* [Basics of statistical analysis. Manual on statistical methods and operations research using STATISTICA and EXCEL Packages]. Moscow, Forum Publ., 2011. 464 p.
  29. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the north-eastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 928, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006
  30. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. Integral assessment of the pyrogenic load by the content of Cu, Pb, Zn and Cd in the components of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *Geosphere Research*, 2019, no. 4, pp. 62–73. In Rus.
  31. Gashkova L.P. Evaluation of the effect of vegetation burnout on the distribution of elements in the peat deposit of a raised bog. *Geosphere Research*, 2022, no. 1, pp. 118–125. In Rus. DOI: 10.17223/25421379/22/9
  32. Stirling E., Macdonald L.M., Smernik R.J., Cavagnaro T.R. Post fire litters are richer in water soluble carbon and lead to increased microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 2019, no. 136, pp. 101–105. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.12.021
  33. Raudina T.V. *Sostav i svoystva zhidkov fazy torfnykh pochv kriolitozony Zapadnoy Sibiri*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Composition and properties of the liquid phase of peat soils in the permafrost zone of Western Siberia. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2018. 24 p.

Received: 19 January 2023.  
Reviewed: 14 February 2023.

#### Information about the authors

**Yulia A. Kharanzhevskaya**, Cand. Sc., senior researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences.

**Anna A. Sinyutkina**, Cand. Sc., senior researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences.

УДК 678.029:544.42:66.092-977

## КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ПАРОВОГО ПИРОЛИЗА ОТРАБОТАННЫХ ШИН

Ларионов Кирилл Борисович<sup>1,2</sup>,  
larryk@tpu.ru

Губин Владимир Евгеньевич<sup>1,3</sup>,  
gubin@tpu.ru

Горшков Александр Сергеевич<sup>1,2</sup>,  
asg47@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,  
Россия, 650026, г. Кемерово, ул. Весенняя 28.

<sup>3</sup> Севастопольский Государственный университет,  
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

**Актуальность** исследования обусловлена долговременным и стабильно высоким уровнем формирования шинных отходов. Кроме того, доля перерабатываемых шин в России в настоящее время невелика в сравнении со странами с высокой экологической культурой. Существуют законодательные рекомендации по вовлечению вторичного сырья в производственный сектор. Предложен возможный способ утилизации отработанных шин путем парового пиролиза, обеспечивающий получение ценных продуктов в виде масла и углеродного остатка. В работе представлено сравнение процессов парового и бескислородного (в среде аргона) пиролиза по значениям величин формальной кинетики, которые могут найти потенциальное применение при разработке или модернизации профильного оборудования.

**Цель:** определение энергии активации процесса разложения отработанных шин в инертной среде аргона и в среде перегретого пара.

**Объекты:** гранулят отработанных шин крупногабаритной карьерной техники, размер фракции 2–4 мм.

**Методы:** термогравиметрический анализ, технический анализ, метод Ozawa–Flynn–Wall, метод Friedman, метод Kissinger–Akahira–Sunose.

**Результаты.** По данным термогравиметрического анализа были определены значения параметров процесса термического разложения. С повышением скорости нагрева независимо от типа среды наблюдались: увеличение максимальной скорости потери массы, большее количество углеродного остатка пиролиза и смещение процесса в высокотемпературную область. Применение пара в качестве инертного агента обеспечивает более интенсивный и равномерный процесс при характерных температурах ниже на 75–90 °С. С использованием изоконверсионных методов расчета (Friedman, OFW, KAS) были определены значения энергии активации разложения образца отработанных шин в среде аргона и пара. Средние значения энергии активации в среде аргона и пара составили 98,9 и 268,4 кДж/моль соответственно.

### Ключевые слова:

отработанные шины, паровой пиролиз, термогравиметрический анализ, технический анализ, формальная кинетика, энергия активации.

### Введение

В настоящее время деятельность различных отраслей народного хозяйства сопряжена с автотранспортными грузоперевозками. По данным Федеральной службы государственной статистики [1] в 2021 г. в Российской Федерации было произведено в натуральном выражении около 55,9 млн шин. Согласно ретроспективным данным [2, 3] шинная отрасль характеризуется стабильным объемом производства. При этом ежегодное формирование шинных отходов составляет около 1,5–1,7 млн т. Данные отходы относятся к IV классу опасности и характеризуются высокой пожароопасностью и выделением большого количества токсичных газов при горении [4]. Период естественного разложения шин составляет 50–100 лет [5]. Кроме того, при контакте шин с водой (дождевой или грунтовой) из них вымываются токсичные соединения [6]. Стоит отметить, что в развитых странах несанкционированное складирование отработанных шин (в т. ч. на мусорных полигонах) запрещено.

Одним из эффективных и экологически безопасных способов переработки шин является технология парового пиролиза [7]. Ее преимуществами являются: обеспечение взрывобезопасности, обезвреживание экологически опасных соединений в парогазовой смеси, повышение энергетической ценности неконденсируемых газофазных соединений (за счет повышения концентрации водорода), активация углеродного материала и возможность обеспечения плавного регулирования процесса.

Большинство исследований кинетики процесса термического разложения отработанных шин основано на использовании инертных газов ( $N_2/Ar$ ) или  $CO_2$ . Прежде всего это связано с устоявшимся использованием бескислородных систем пиролиза в промышленности [8].

В работе [9] были исследованы процесс пиролиза отработанных шин в среде аргона в реакторе с неподвижным слоем и влияние добавления катализаторов различного происхождения. Определенное методом

Kissinger значение энергии активации составило 99 кДж/моль. Сравнение термического разложения в среде гелия в условиях вакуума и при атмосферном давлении представлено в [10]. Установлено, что энергия активации при термическом разложении образца шин составляла 126,7 и 107,9 кДж/моль при атмосферном давлении и в вакууме соответственно.

В работе [11] представлены результаты исследования кинетики разложения различных частей шины (внешней, боковой и внутренней) в среде аргона. Интервал полученных значений энергии активации термического разложения рассматриваемых частей шин составил 53,78–80,82 кДж/моль, что обусловлено различным типом используемых компонент при изготовлении элементов покрышки. Бутилкаучук, применяемый во внутренней части шины, обеспечивает меньшую энергию активации в сравнении с изопреновым каучуком.

Авторами работы [12] представлено сравнение энергии активации пиролиза легковых и грузовых шин. По результатам термогравиметрии в атмосфере аргона определены энергии активации, которые составили 135,9 и 77,5 кДж/моль для легковых и грузовых шин соответственно.

Исследование кинетики термического разложения резиновой крошки в двухкомпонентной атмосфере аргон–пар представлено в работе [13]. Авторами для определения энергии активации была использована модель распределенной энергии активации. Энергия активации натурального и синтетического каучуков – 132,4 и 168,9 кДж/моль, соответственно.

Таким образом, в научно-технической литературе представлено ограниченное количество результатов исследований кинетики процесса термического разложения отработанных шин в среде перегретого пара.

В настоящей работе представлен сравнительный анализ результатов экспериментального исследования кинетики процесса термической конверсии отработанных шин в среде аргона и перегретого пара методом термогравиметрического анализа.

#### Материалы и методы

В качестве исходного образца использована резиновая крошка отработанных шин крупногабаритной карьерной техники типа БелАЗ (ОАО «Белшина», Беларусь), измельченная до фракции 2–4 мм на предприятии ООО «СибЭкоПром» (Ленинск-Кузнецкий, Россия).

Технические характеристики (внешняя влага, летучие соединения, зольность и теплота сгорания) были определены с помощью стандартных методик: ГОСТ Р 52911-2020 «Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги»; ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности»; ГОСТ Р 55660-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ»; ГОСТ 147-2013 «Топливо твердое минеральное. Содержание углерода, водорода, азота и серы было определено с помощью элементного анализатора Flash 2000 CHNS (Thermo Fisher Scientific, США). В табл. 1 представлены результаты определения технических характеристик и элементного состава исследуемого образца отработанных шин.

Таблица 1. Физико-химические характеристики

Table 1. Proximate and ultimate analysis

Характеристика Characteristic	Значение Value
Влажность $M^r$ , мас. %/Moisture content $M^r$ , wt. %	0,9
Зольность $A^r$ , мас. %/Ash content $A^r$ , wt. %	5,9
Содержание летучих соединений $V^{daf}$ , мас. % Volatile matters $V^{daf}$ , wt. %	69,8
Низшая теплота сгорания $Q_i^r$ , МДж/кг Lowest heat value $Q_i^r$ , MJ/kg	38,4
Элементный состав, мас. %/Elemental composition, wt. %	
C	83,5
H	8,2
N	0,4
S	1,2

$r$  – рабочая масса/wet basis,  $d$  – сухая масса/dry basis,  $^{daf}$  – сухая обеззоленная масса/dry and ash-free basis.

Исследуемый образец отработанных шин характеризуется относительно высоким содержанием летучих соединений [14, 15]. Авторами других работ [16, 17] приводятся сопоставимые значения низшей теплоты сгорания. Также образец характеризуется сравнительно высоким значением зольности, что является причиной меньшей реакционной способности получаемого полуккокса при термической конверсии [14].

Исследование термического разложения образца отработанных шин проводилось с помощью синхронного термогравиметрического анализатора STA 449 C Jupiter (Netzsch, Germany) в среде аргона и перегретого пара. Масса образца в обоих случаях составляла около 10 мг, расход среды 100 мл/мин, максимальная температура нагрева 800 и 1000 °С для среды аргона и пара, соответственно. Скорость нагрева составляла 2,5; 5; 10 и 20 °С/мин.

Определение энергии активации процесса разложения образца в исследуемых средах осуществлялось методами Friedman, Ozawa–Flynn–Wall (OFW) и Kissinger–Akahira–Sunose (KAS), подробное описание методов представлено в работах [18, 19]. Данные методы являются изоконверсионными, что соответствует используемому в настоящей работе экспериментальным условиям.

По результатам термогравиметрического анализа для нескольких скоростей нагрева выделяются температуры для одинаковых степеней конверсии, строятся различные графики и далее определяется значение энергии активации от степени конверсии.

Метод Friedman (1) основан на следующей форме записи уравнения Аррениуса:

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln[f(\alpha)A_\alpha] - \frac{E_\alpha}{RT_i}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – степень конверсии;  $d\alpha/dt$  – скорость изменения массы (ДТГ);  $f(\alpha)$  – модель реакции;  $A_\alpha$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_\alpha$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_i$  – температура для  $i$ -й степени конверсии.

Для  $i$ -й степени конверсии энергия активации определяется наклоном прямой (2), (3):

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = f\left(\frac{1}{T_i}\right); \quad (2)$$

$$E_\alpha = -R \cdot \frac{\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)}{\frac{1}{T_i}}. \quad (3)$$

Подход для метода OFW схожий. Выражение, характеризующее термическое разложение (4):

$$\ln(\beta_i) = \text{const} - 1,052 \left( \frac{E_a}{RT_i} \right), \quad (4)$$

где  $\beta_i$  – скорость нагрева.

Метод KAS характеризуется следующей зависимостью (5):

$$\ln \left( \frac{\beta}{T_i^{1,92}} \right) = \text{const} - 1,0008 \left( \frac{E_a}{RT_i} \right). \quad (5)$$

### Результаты и обсуждение

На рис. 1, 2 представлены результаты термогравиметрического анализа исследуемого образца отработанных шин в среде пара (рис. 1, а; 2, а) и аргона (рис. 1, б; 2, б) в виде профилей ТГ и ДТГ.

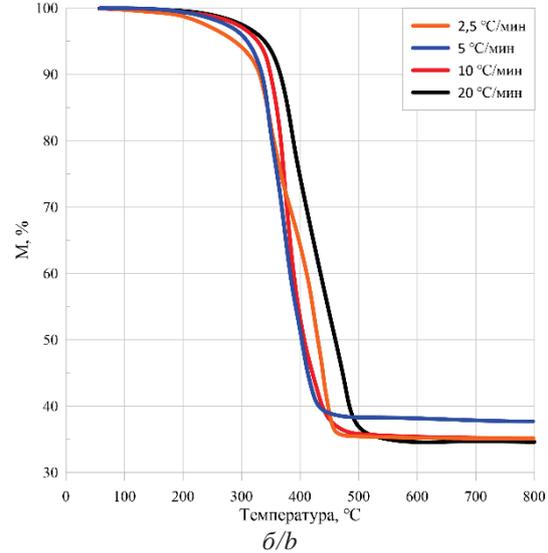
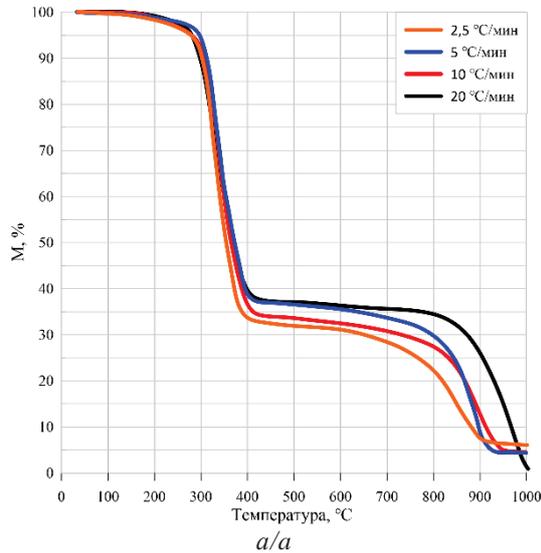


Рис. 1. ТГ-профили термического разложения исследуемого образца отработанных шин в среде пара (а) и аргона (б)  
 Fig. 1. TG profiles of thermal decomposition of the waste tire sample in steam atmosphere (a) and argon atmosphere (b)

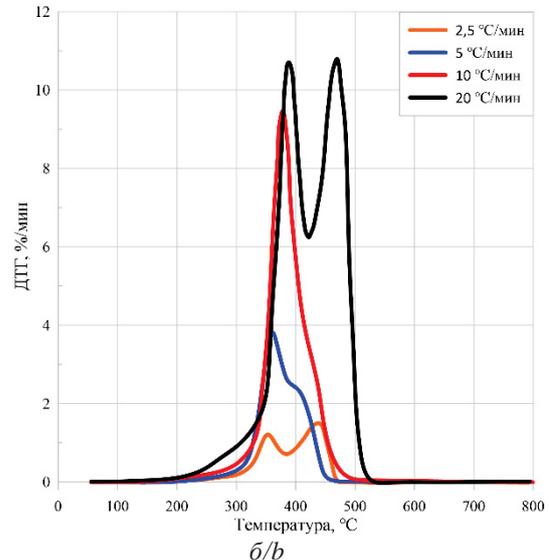
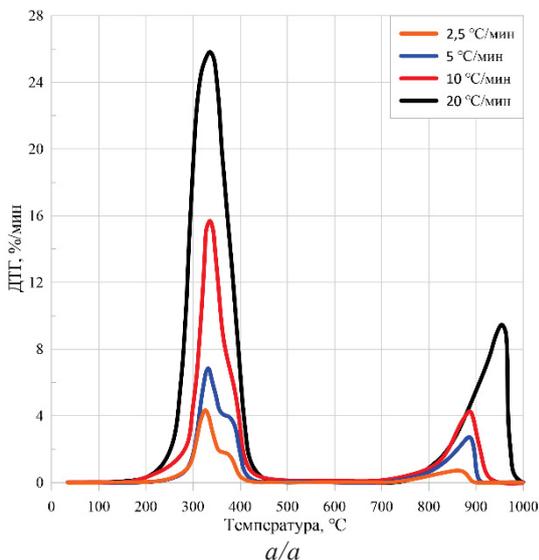


Рис. 2. ДТГ-профили термического разложения исследуемого образца отработанных шин в среде пара (а) и аргона (б)  
 Fig. 2. DTG profiles of thermal decomposition of the waste tire sample in steam atmosphere (a) and argon atmosphere (b)

Результаты ТГ (рис. 1) свидетельствуют о том, что процесс термического преобразования исследуемого образца отработанных шин характеризуется следующими стадиями: потеря внешней влаги (до 120 °С), инертный прогрев и незначительная потеря массы (от 120 до 300 °С), интенсивная потеря массы (выход летучих соединений (ароматических углеводородов [20])) в процессе пиролиза (до 450 °С), инертное разложение остаточных тяжелых углеводородов и кар-

бонизация углеродного остатка (до 800 °С), газификация (свыше 800 °С в среде пара). Независимо от типа используемой среды, первые две стадии определяются в близких по значению температурных интервалах (около 150–300 °С). Более значительные различия можно наблюдать для стадии пиролиза (300–450 °С), где в случае использования среды пара прослеживается смещение процесса в область меньших температур с увеличением интенсивности убыли

массы. Данный эффект может быть связан с различием теплофизических характеристик используемых агентов и также был обнаружен авторами другой работы [13], в которой представлены результаты сравнительного исследования термического разложения элементов различных типов отработанных шин в среде аргона и пара при постоянной скорости нагрева 10 °С/мин.

Также в случае использования пара в температурном интервале 400–700 °С можно наблюдать более крутой наклон ТГ-профиля, что нехарактерно для аналогичных кривых, полученных в среде аргона. Это может быть связано с разложением остаточных тяжелых углеводородов, которые используются в качестве вулканизирующих агентов. В работе [21] сообщается, что пар обладает меньшим размером молекулы в сравнении с другим агентом (согласно [22, 23], размер  $\text{Ar}$  и  $\text{H}_2\text{O}$  0,363 и 0,280 нм, соответственно), что обеспечивает более интенсивное диффундирование в материал. Таким образом, можно предположить, что молекулы водяного пара диффундируют в агломерированные частицы углеродного остатка, что способствует термическому разложению остаточных углеводородов. В свою очередь, авторами работы [12] для данного температурного интервала также было обнаружено изменение массы углеродного остатка пиролиза отработанных шин, что было связано с процессом дегазации.

При этом стоит отметить, что нарушается закономерность, характерная для разложения в инертной среде – смещение убыли массы в зону больших температур в зависимости от скорости нагрева  $\beta$ . С ростом  $\beta$  также усиливается влияние термической инерции, обусловленное разностью температуры греющей среды и образца, который отличается низкой теплопроводностью [24, 25].

По данным ДТГ (рис. 2) видно, что экстремумы характерных профилей для образца, пребывающего в среде пара, в среднем в 1,4 раза больше, чем для аргона. ДТГ-профили, характеризующие процесс термического разложения исследуемых образцов отработанных шин в среде аргона (рис. 2, б) при скоростях нагрева 2,5 и 20 °С/мин, имеют бимодальный вид и определяются в температурном интервале 350–450 и 350–500 °С, соответственно. Это может быть связано с качественным и количественным составом исследуемого образца отработанной шины. В работе [26] наличие бимодального распределения ДТГ объясняется последовательным разложением натурального и синтетического каучуков. Данный вывод подтверждается также работами [10, 27], посвященными разложению легковых шин в инертной среде аргона.

В табл. 2 представлены параметры процесса термического разложения образца отработанных шин, вычисленные по данным ТГ и ДТГ (рис. 1, 2) графическим методом [28].

Температура начала интенсивного разложения  $T_d$  исследуемого образца определяется в интервале 280–310 °С, независимо от скорости нагрева и типа используемой среды. Применение пара в качестве инертного агента обеспечивает, при прочих равных

условиях, меньшую (в среднем на 15 %) температуру окончания процесса пиролиза  $t_p$ . Явной зависимости данного параметра от скорости нагрева не наблюдается. Согласно данным, представленным в табл. 2, паровой пиролиз позволяет в аналогичных режимах уменьшить время процесса в 1,3–2,1 раза. Меньшее значение массы образующегося углеродного остатка по завершению стадии процесса пиролиза в паровой среде связано с процессом активации получаемого продукта [29].

**Таблица 2.** Параметры термического разложения отработанных шин

**Table 2.** Characteristics of thermal decomposition of waste tire

Параметр Parameter	Скорость нагрева, °С/мин Heating rate, °C/min							
	2,5		5		10		20	
	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ar}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ar}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ar}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ar}$
$t_d$ , °С	301,5	300	301,2	305	305,6	310	299,7	280
$t_p$ , °С	401,1	470	414,9	455	410,3	500	420,5	525
$\tau_p$ , мин (min)	39,8	68	22,7	30	10,5	19	6,0	12,3
$m_p$ , %	31,3	35,3	34,9	38,0	31,7	35,4	36,3	34,9
$t_g$ , °С	701,0	–	801,2	–	815,2	–	815,6	–
$t_f$ , °С	920	–	925	–	950	–	Н/Д	–
$m_f$ , %	~6,2	–	~4,6	–	~5,3	–	~1	–
$w_{\max}$ , %/мин (%/min)	2,8	1,5	4,5	3,8	10,0	9,5	16,5	10,8
$t_{\max}$ , °С	327	440	329	360	335	380	340	470

$t_d$  – температура начала процесса пиролиза;  $t_p$  – температура окончания процесса пиролиза;  $t_g$  – температура начала процесса газификации;  $t_f$  – температура окончания процесса газификации;  $t_{\max}$  – температура, соответствующая максимальной скорости потери массы образца;  $\tau_p$  – продолжительность процесса пиролиза;  $m_p$  – массовый остаток после процесса пиролиза;  $m_f$  – массовый остаток после процесса газификации;  $w_{\max}$  – максимальная скорость потери массы.

$t_d$  – initial temperature of pyrolysis;  $t_p$  – final temperature of pyrolysis;  $t_g$  – initial temperature of gasification;  $t_f$  – final temperature of gasification;  $t_{\max}$  – temperature corresponds to the maximum reaction rate;  $\tau_p$  – duration of pyrolysis;  $m_p$  – carbon residue of pyrolysis;  $m_f$  – carbon residue of gasification;  $w_{\max}$  – maximum value of the weight change.

Использование перегретого пара в качестве инертного агента обеспечивает большую на 32 % максимальную скорость разложения. Данная скорость при использовании аргона лежит в относительно широком интервале (360–470 °С) по сравнению с паром (327–360 °С).

Температура начала и завершения процесса газификации возрастает с увеличением скорости нагрева. Стоит отметить, что масса зольного остатка, образующегося в результате газификации, несколько отличается от определенного в техническом анализе (табл. 1). Увеличение и уменьшение массы обусловлено различными химическими реакциями (окислением золы, вторичными реакциями, вымыванием водяным паром различных металлов) [30, 31]. Например, оксид кремния (доля кремния по данным АЭС – 37 % [31]) при нагревании может частично окисляться.

Зависимость изменения значения энергии активации от степени конверсии для процесса пиролиза пред-

ставлена на рис. 3. Средняя энергия активации, определенная по методу Friedman для сред пара и аргона, составила 256,3 и 80,7 кДж/моль соответственно для метода OFW – 298,7 и 110,4 кДж/моль, для метода

KAS – 304,3 и 105,5 кДж/моль. Ранее авторами других работ [32, 33] было также установлено, что значение энергии активации для пиролиза отработанных шин в инертном газе составляет от 56 до 215 кДж/моль.

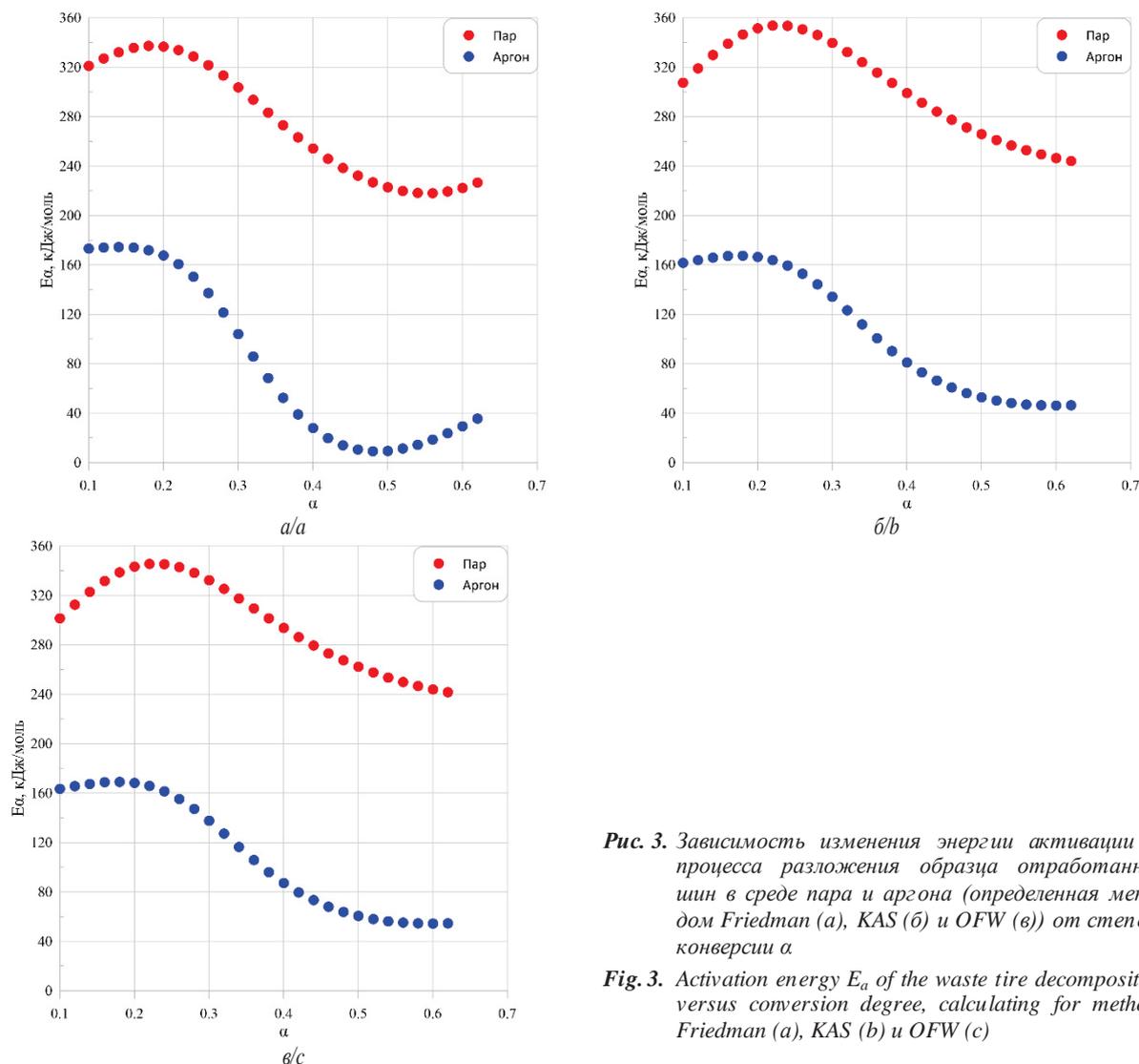


Рис. 3. Зависимость изменения энергии активации  $E_a$  процесса разложения образца отработанных шин в среде пара и аргона (определенная методом Friedman (а), KAS (б) и OFW (в)) от степени конверсии  $\alpha$

Fig. 3. Activation energy  $E_a$  of the waste tire decomposition versus conversion degree, calculating for methods Friedman (a), KAS (b) и OFW (c)

Зависимость энергии активации процесса разложения исследуемого образца от степени конверсии имеет схожий вид независимо от применяемого метода и агента (пар и аргон). На рис. 3 наблюдается два участка со степенью конверсии менее 0,3 и более 0,3. Первый участок характеризуется рефлексом, соответствующим степени конверсии 0,2–0,25. Данный пик связан с процессом разложения натурального каучука. Дальнейшее спад энергии активации и экстремум для метода Friedman (рис. 3, а) характеризует разложение синтетического каучука. Схожий вид зависимости энергии активации от степени конверсии также был обнаружен и другими авторами [34, 35], которые проводили исследование разложения многокомпонентного сырья (отработанных шин и биомассы). В то же время, как упоминалось ранее, разложение в среде пара протекает быстрее. Это связано с моделью самой реакции, при этом предэкспоненциальный фактор для парового разложения несколько больше.

### Закключение

В настоящей работе методом термогравиметрического анализа исследован процесс термического разложения отработанных шин крупногабаритной карьерной техники в среде перегретого пара и аргона при скоростях нагрева 2,5–20 °С/мин до 1000 °С и расходе 100 мл/мин.

Установлено, что процесс пиролиза отработанных шин независимо от скорости нагрева определяется в температурном интервале 280–525 °С. С повышением скорости нагрева процесс смещается в высокотемпературную область при сравнительно постоянном значении температуры начала термического разложения (пиролиза). В свою очередь использование пара приводит к интенсификации процесса пиролиза, что выражается в уменьшении температуры окончания процесса  $t_f$  (на 40–105 °С в зависимости от скорости нагрева), сокращении его продолжительности  $\tau_p$  (на

6,3–28,2 мин) и увеличении максимальной скорости реакции (на 0,5–5,7 %/мин).

В случае использования пара при температуре свыше 800 °С процесс характеризовался началом интенсивной убыли массы углеродного остатка, что связано с началом стадии газификации, завершение которой определялось при температуре около 950 °С. При скорости нагрева 2,5 °С/мин температура начала стадии газификации была значительно ниже и составила 701 °С.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Социально-экономическое положение России // Федеральная служба государственной статистики. 2021. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2021.pdf> (дата обращения 25.10.2022).
2. Социально-экономическое положение России // Федеральная служба государственной статистики. 2017. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2017.pdf> (дата обращения 25.10.2022).
3. Социально-экономическое положение России // Федеральная служба государственной статистики. 2018. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2018.pdf> (дата обращения 25.10.2022).
4. Properties of pyrolytic chars and activated carbons derived from pilot-scale pyrolysis of used tires / S.-Q. Li, Q. Yao, S.-E. Wen, Y. Chi, J.-H. Yan // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2005. – V. 55. – № 9. – P. 1315–1326.
5. Переработка изношенных шин и резинотехнических изделий в инертную крошку при использовании установок пульсирующего горения / Г.И. Павлов, А.В. Кочергин, О.Р. Ситников, А.И. Галимова, Р.Ф. Шакуров, К.А. Кочергина, С.Ю. Гармонов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2011. – № 19. – С. 174–179.
6. Отчет о работе Ассоциации производителей и импортеров шин по самостоятельному обеспечению выполнения нормативов утилизации отходов от использования шин и резинотехнических изделий // *ЭкоШинСоюз*. 2020. URL: [https://etu-rf.ru/wp-content/uploads/2020/10/Report\\_rus\\_v2.pdf](https://etu-rf.ru/wp-content/uploads/2020/10/Report_rus_v2.pdf) (дата обращения 25.10.2022).
7. Wang F., Gao N., Qian C. Effect of hot char and steam on products in waste tire pressurized pyrolysis process // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – V. 237. – P. 114105.
8. Waste tyre pyrolysis – a review / J.D. Martinez, N. Puy, R. Murilio, T. Garcia, M.V. Navarro, A.M. Mastral // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – V. 23. – P. 179–213.
9. Rijo B., Dias A.P.S., Wojnicki L. Catalyzed pyrolysis of scrap tires rubber // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – V. 10. – № 1. – P. 107037.
10. Kinetics of scrap tyre pyrolysis under vacuum conditions / G. Lopez, R. Aguado, M. Olazar, M. Arabiourrutia, J. Bilbao // *Waste Management*. – 2009. – V. 29. – № 10. – P. 2649–2655.
11. Shahi A., Dwivedi C., Manjare S. Experimental and theoretical investigation on pyrolysis of various sections of the waste tire and its components // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2022. – V. 179. – P. 66–76.
12. Kandasamy J., Gökalp I. Pyrolysis, combustion, and steam gasification of various types of scrap tires for energy recovery // *Energy & Fuels*. – 2015. – V. 29. – № 1. – P. 346–354.
13. Piatkowski N., Steinfeld A. Reaction kinetics of the combined pyrolysis and steam-gasification of carbonaceous waste materials // *Fuel*. – 2010. – V. 89. – № 5. – P. 1133–1140.
14. Pyrolysis characteristics of waste tire particles in fixed-bed reactor with internals / S. Xu, D. Lai, X. Zeng, L. Zhang, Z. Han, J. Cheng, R. Wu, O. Mašek, G. Xu // *Carbon Resources Conversion*. – 2018. – V. 1. – № 3. – P. 228–237.
15. Effect of advanced catalysts on tire waste pyrolysis oil / R. Mianadad, M.A. Barakat, M. Rehan, A.S. Aburiazza, J. Gardy, A.S. Nizami // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2018. – V. 116. – P. 542–552.
16. Dataset from analytical pyrolysis assays for converting waste tires into valuable chemicals in the presence of noble-metal catalysts / B.S. Azócar, P.O. Vargas, C. Campos, F. Medina, L.E. Arteaga-Pérez // *Data in Brief*. – 2022. – V. 40. – P. 107745.
17. Biofuel from Co-pyrolysis of solid tire waste and rice husk / M.S. Hossain, M.R. Islam, M.S. Rahman, M.A. Kader, H. Hanu // *Energy Procedia*. – 2017. – V. 110. – P. 453–458.
18. Applications of kinetic methods in thermal analysis: a review / X. Zhang // *Engineered Science*. – 2021. – V. 14. – P. 1–13.
19. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data / S. Vyazovkin, A.K. Burnham, J.M. Criado, L.A. Pérez-Maqueda, C. Popescu, N. Sbirrazzuoli // *Thermochemical Acta*. – 2011. – V. 520. – № 1–2. – P. 1–19.
20. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis / H. Yang, R. Yan, H. Chen, D.H. Lee, C. Zheng // *Fuel*. – 2007. – V. 86. – № 12–13. – P. 1781–1788.
21. Wigmans T. Industrial aspects of production and use of activated carbons // *Carbon*. – 1989. – V. 27. – № 1. – P. 13–22.
22. Vallejos-Burgos F., Coudert F.X., Kaneko K. Air separation with graphene mediated by nanowindow-rim concerted motion // *Nature communications*. – 2018. – V. 9. – P. 1812.
23. D'Arrigo J.S. Screening of membrane surface charges by divalent cations: an atomic representation // *American Journal of Physiology-Cell Physiology*. – 1978. – V. 235. – № 3. – P. 109–117.
24. Combustion characteristics of fine- and micro-pulverized coal in the mixture of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> / X. Huang, X. Jiang, X. Han, H. Wang // *Energy Fuels*. – 2008. – V. 22. – № 6. – P. 3756–3762.
25. Co-combustion of different sewage sludge and coal: a non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis / M. Otero, L.F. Calvo, M.V. Gil, A.I. García, A. Morán // *Bioresource Technology*. – 2008. – V. 99. – № 14. – P. 6311–6319.
26. High-quality syngas production: the green and efficient utilization of waste tire and waste heat from the steelmaking converter process / J. Zhou, W. Song, Y. Li, B. Wang, R. Cheng // *Waste Management*. – 2021. – V. 131. – P. 98–107.
27. Iwarere S.A., Mkhize N.M. Pyrolysis of various tyre types: characteristics and kinetic studies using thermogravimetric analysis // *Detritus*. – 2020. – V. 9. – P. 165–173.
28. Analysis of the physicochemical characteristics of biochar obtained by slow pyrolysis of nut shells in a nitrogen atmosphere / A. Gorshkov, N. Berezikov, A. Kaltaev, S. Yankovsky, K. Slyusarskiy, R. Tabakaev, K. Laionov // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 23. – P. 8075.
29. Comparative analysis of the characteristics of carbonaceous material obtained via single-staged steam pyrolysis of waste tires / K.B. Larionov, K.V. Slyusarskiy, A.A. Ivanov, I.V. Mishakov, A.Y. Pak, S.A. Jankovsky, V.O. Stoyanovskii, A.A. Vedyagin, V.E. Gubin // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2022. – V. 72. – № 2. – P. 161–175.
30. Spent mushroom substrate performance for pyrolysis, steam co-gasification, and ash melting / K. Koido, T. Ogura, R. Matsumoto, K. Endo, M. Sato // *Biomass and Bioenergy*. – 2021. – V. 145. – P. 105954.
31. Characterization and potential applications of pyrolytic char from ablative pyrolysis of used tires / R. Helleur, N. Popovic, M. Ikura, M. Stanculescu, D. Liu // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2001. – V. 58–59. – P. 813–824.
32. Yang J., Kaliaguine S., Roy C. Improved quantitative determination of elastomers in tire rubber by kinetic simulation of DTG curves // *Rubber Chemistry and Technology*. – 1993. – V. 66. – № 2. – P. 213–229.
33. Kim S., Park J.K., Chun H.-D. Pyrolysis kinetics of scrap tire rubbers. I: using DTG and TGA // *Journal of Environmental Engineering*. – 1995. – V. 121. – № 7. – P. 507–514.

34. Söyler N., Ceylan S. Thermokinetic analysis and product characterization of waste tire-hazelnut shell co-pyrolysis: TG-FTIR and fixed bed reactor study // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – V. 9. – № 5. – P. 106165.
35. Kinetic analysis of digestate slow pyrolysis with the application of the master-plots method and independent parallel reactions scheme /

P. Bartocci, R. Tschentscher, R.E. Stensrød, M. Barbanera, F. Fantozzi // Molecules. – 2019. – V. 24. – № 9. – P. 1657.

Поступила: 20.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 10.04.2023 г.

#### Информация об авторах

**Ларионов К.Б.**, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; заведующий лабораторией катализа и преобразования УСМ с получением полезных продуктов Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

**Губин В.Е.**, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; заведующий кафедрой паротурбинных установок Севастопольского Государственного университета.

**Горшков А.С.**, младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов энергетической отрасли Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; научный сотрудник лаборатории катализа и преобразования УСМ с получением полезных продуктов Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

UDC 678.029:544.42:66.092-977

## WASTE TIRE STEAM PYROLYSIS KINETIC

Kirill B. Larionov<sup>1,2</sup>,  
larryk@tpu.ru

Vladimir E. Gubin<sup>1,3</sup>,  
gubin@tpu.ru

Alexander S. Gorshkov<sup>1,2</sup>,  
asg47@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Kuzbass State Technical University,  
28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650026, Russia.

<sup>3</sup> Sevastopol State University,  
33, Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russia.

**The relevance** of the study is determined by the long-term and consistently high level of tire waste formation. In addition, the amount of recycled tires in Russia is currently smaller compared to countries with high environmental culture. There are state recommendations on the involvement of secondary raw materials in the manufacturing sector. A possible method for recycling waste tires by steam pyrolysis is proposed, which provides obtaining valuable products in the form of oil and carbon residue. The paper presents a comparison of the processes of steam and oxygen-free (argon) pyrolysis in terms of the values of formal kinetics, which can be used in the development or modernization of industrial equipment.

**The aim** of the research is to determine the activation energy of waste tire decomposition in inert argon medium and in superheated steam medium.

**Objects:** waste tire granulate from extra-large vehicles.

**Methods:** thermogravimetric analysis, proximate analysis, in-line gas analysis, Ozawa–Flynn–Wall method, Friedman method, Kissinger–Akahira–Sunosse method.

**Results.** According to the data of thermogravimetric analysis, the values of the parameters of thermal decomposition were determined. With an increase in the heating rate, regardless of the type of medium, the following was observed: clear increase in the maximum mass loss rate, larger mass of the pyrolysis residue, and shift of the process to a high-temperature region. The use of steam as an inert agent provides a more intense and uniform process at a typical temperatures lower by 75–90 °C. Using isoconversional calculation methods (Friedman, OFW, KAS), the values of the activation energy for the decomposition of a waste tire sample in argon and steam mediums were determined. The average activation energies in argon and steam were 98,9 and 268,4 kJ/mol, respectively.

**Key words:**

waste tire, steam pyrolysis, thermal analysis, proximate analysis, formal kinetics, activation energy.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. 075-03-2023-045/ (FZES-2021-0008)).

## REFERENCES

1. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Sotsialno-ekonomicheskoe polozhenie Rossii* [Federal State Statistics Service. The economic and social situation in Russia]. 2021. Available at: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2021.pdf> (accessed 25 October 2022).
2. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Sotsialno-ekonomicheskoe polozhenie Rossii* [Federal State Statistics Service. The economic and social situation in Russia]. 2017. Available at: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2017.pdf> (accessed 25 October 2022).
3. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Sotsialno-ekonomicheskoe polozhenie Rossii* [Federal State Statistics Service. The economic and social situation in Russia]. 2018. Available at: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2018.pdf> (accessed 25 October 2022).
4. Li S.-Q., Yao Q., Wen S.-E., Chi Y., Yan J.-H. Properties of pyrolytic chars and activated carbons derived from pilot-scale pyrolysis of used tires. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, vol. 55, no. 9, pp. 1315–1326.
5. Pavlov G.I., Kochergin A.V., Sitnikov O.R., Galimova A.I., Shakurov R.F., Kochergina K.A., Garmonov S.Yu. Processing of used tires and rubber products into rubber granulate using the irregular combustion units. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2011, no. 19, pp. 174–179. In Rus.
6. Otchet o rabote Assotsiatsii proizvoditeley i importerov shin po samostoyatelnomu obespecheniyu vypolneniya normativov utilizatsii otkhodov ot ispolzovaniya shin i rezinotekhnicheskikh izdeliy [Report on the work of Association of producers and importers of tires in self-production of fulfilling norms of waste utilization from tire and rubber product application]. *EkoShinSoyuz*. 2020. Available at: [https://etu-rf.ru/wp-content/uploads/2020/10/Report\\_rus\\_v2.pdf](https://etu-rf.ru/wp-content/uploads/2020/10/Report_rus_v2.pdf) (accessed 25 October 2022).
7. Wang F., Gao N., Quan C. Effect of hot char and steam on products in waste tire pressurized pyrolysis process. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 237, pp. 114105.
8. Martinez J.D., Puy N., Murilio R., Garcia T., Navarro M.V., Masstral A.M. Waste tyre pyrolysis – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 23, pp. 179–213.
9. Rijo B., Dias A.P.S., Wojnicki L. Catalyzed pyrolysis of scrap tires rubber. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 107037.
10. Lopez G., Aguado R., Olazar M., Arabiourrutia M., Bilbao J. Kinetics of scrap tyre pyrolysis under vacuum conditions. *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 10, pp. 2649–2655.

11. Shahi A., Dwivedi C., Manjare S. Experimental and theoretical investigation on pyrolysis of various sections of the waste tire and its components. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 179, pp. 66–76.
12. Kandasamy J., Gökalp I. Pyrolysis, combustion, and steam gasification of various types of scrap tires for energy recovery. *Energy & Fuels*, 2015, vol. 29, no. 1, pp. 346–354.
13. Piatkowski N., Steinfeld A. Reaction kinetics of the combined pyrolysis and steam-gasification of carbonaceous waste materials. *Fuel*, 2010, vol. 89, no. 5, pp. 1133–1140.
14. Xu S., Lai D., Zeng X., Zhang L., Han Z., Cheng J., Wu R., Mašek O., Xu G. Pyrolysis characteristics of waste tire particles in fixed-bed reactor with internals. *Carbon Resources Conversion*, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 228–237.
15. Miandad R., Barakat M.A., Rehan M., Aburiazaiza A.S., Gardy J., Nizami A.S. Effect of advanced catalysts on tire waste pyrolysis oil. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, vol. 116, pp. 542–552.
16. Azócar B.S., Vargas P.O., Campos C., Medina F., Arteaga-Pérez L.E. Dataset from an analytical pyrolysis assays for converting waste tires into valuable chemicals in the presence of noble-metal catalysts. *Data in Brief*, 2022, vol. 40, pp. 107745.
17. Hossain M.S., Islam M.R., Rahman M.S., Kader M.A., Haniu H. Biofuel from Co-pyrolysis of Solid Tire Waste and Rice Husk. *Energy Procedia*, 2017, vol. 110, pp. 453–458.
18. Zhang X. Applications of kinetic methods in thermal analysis: a review. *Engineered Science*, 2021, vol. 14, pp. 1–13.
19. Vyazovkin S., Burnham A.K., Criado J.M., Pérez-Maqueda L.A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 520, no. 1–2, pp. 1–19.
20. Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 2007, vol. 86, no. 12–13, pp. 1781–1788.
21. Wigmans T. Industrial aspects of production and use of activated carbons. *Carbon*, 1989, vol. 27, no. 1, pp. 13–22.
22. Vallejos-Burgos F., Coudert F.X., Kaneko K. Air separation with graphene mediated by nanowindow-rim concerted motion. *Nature communications*, 2018, vol. 9, pp. 1812.
23. D'Arrigo J.S. Screening of membrane surface charges by divalent cations: an atomic representation. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 1978, vol. 235, no. 3, pp. 109–117.
24. Huang X., Jiang X., Han X., Wang H. Combustion Characteristics of fine- and micro-pulverized coal in the mixture of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>. *Energy Fuels*, 2008, vol. 22, no. 6, pp. 3756–3762.
25. Otero M., Calvo L.F., Gil M.V., García A.I., Morán A. Co-combustion of different sewage sludge and coal: A non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, no. 14, pp. 6311–6319.
26. Zhou J., Song W., Li Y., Wang B., Cheng R. High-quality syngas production: the green and efficient utilization of waste tire and waste heat from the steelmaking converter process. *Waste Management*, 2021, vol. 131, pp. 98–107.
27. Iwarere S.A., Mkhize N.M. Pyrolysis of various tyre types: characteristics and kinetic studies using thermogravimetric analysis. *Derivatus*, 2020, vol. 9, pp. 165–173.
28. Gorshkov A., Berezikov N., Kaltaev A., Yankovsky S., Slyusarsky K., Tabak aev R., Larionov K. Analysis of the physicochemical characteristics of biochar obtained by slow pyrolysis of nut shells in a nitrogen atmosphere. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 23, pp. 8075.
29. Larionov K.B., Slyusarskiy K.V., Ivanov A.A., Mishakov I.V., Pak A.Y., Jankovsky S.A., Stoyanovskii V.O., Vedyagin A.A., Gubin V.E. Comparative analysis of the characteristics of carbonaceous material obtained via single-staged steam pyrolysis of waste tires. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2022, vol. 72, no. 2, pp. 161–175.
30. Koido K., Ogura T., Matsumoto R., Endo K., Sato M. Spent mushroom substrate performance for pyrolysis, steam co-gasification, and ash melting. *Biomass and Bioenergy*, 2021, vol. 145, pp. 105954.
31. Helleur R., Popovic N., Ikura M., Stanculescu M., Liu D. Characterization and potential applications of pyrolytic char from ablative pyrolysis of used tires. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2001, vol. 58–59, pp. 813–824.
32. Yang J., Kaliaguine S., Roy C. Improved quantitative determination of elastomers in tire rubber by kinetic simulation of DTG curves. *Rubber Chemistry and Technology*, 1993, vol. 66, no. 2, pp. 213–229.
33. Kim S., Park J.K., Chun H.-D. Pyrolysis kinetics of scrap tire rubbers. I: using DTG and TGA. *Journal of Environmental Engineering*, 1995, vol. 121, no. 7, pp. 507–514.
34. Söyler N., Ceylan S. Thermokinetic analysis and product characterization of waste tire-hazelnut shell co-pyrolysis: TG-FTIR and fixed bed reactor study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 106165.
35. Bartocci P., Tschentscher R., Stensrød R.E., Barbànera M., Fantozzi F. Kinetic analysis of digestate slow pyrolysis with the application of the master-plots method and independent parallel reactions scheme. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 9, pp. 1657.

Received: 20 November 2022.

Reviewed: 10 April 2023.

#### Information about the authors

**Kirill B. Larionov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University; head of the laboratory, Kuzbass State Technical University.

**Vladimir E. Gubin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University; head of department, Sevastopol State University.

**Alexander S. Gorshkov**, junior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University; researcher, Kuzbass State Technical University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*  
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*  
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 28.06.2023. Дата выхода журнала: 30.06.2023.  
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 24,78. Уч.-изд. л. 22,41.  
Заказ 195-23. Тираж 500 экз. Цена свободная.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.



TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY



ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ